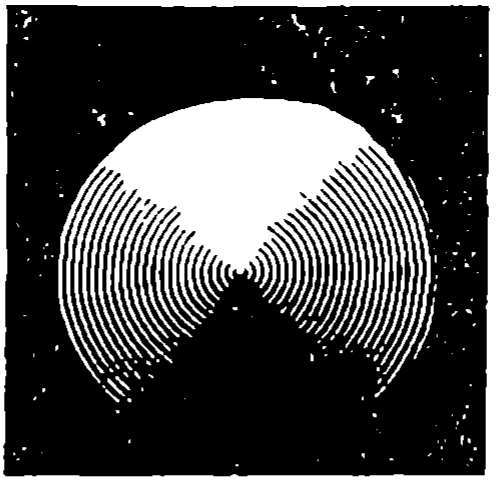
G. YA. MIAKISHEV

FISICA

4

FÍSICA

4



Г.Я. Мякишев
Б.Б. Буховцев

"Физика"

Учебник для
10 класса

Москва
"Просвещение

G.Ya.Miákishev B.B.Bújovtsev

FÍSICA 4

Traducido del ruso por el ingeniero
Antonio Molina García

Editorial Mir Moscú

Impreso en la URSS

A nuestros lectores:

Mir edita libros soviéticos traducidos al español inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas· literatura sobre ciencias naturales y médicas También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia–ficción

Dirijan sus opiniones a Editorial Mir, I Rizhskí per., 2, 129820, Moscú, GSP, I–110, URSS

На испанском языке

© издательство «Просвещение» 1983
© traducción al español, editorial Mir, 1986

Indice

Oscilaciones y ondas

Introducción 11

1. Oscilaciones mecánicas 12

1 1 Oscilaciones libres y forzadas 12
1 2 Condiciones necesarias para que se produzcan oscilaciones libres 14
1 3 Péndulo simple 16
1.4 Dinámica del movimiento oscilatorio 18
1 5 Oscilaciones armónicas 20
1 6 Fase de las oscilaciones 25
1 7 Velocidad y aceleración en las oscilaciones armónicas 28
1 8 Transformaciones de la energía en el caso de las oscilaciones armónicas 29
1 9 Oscilaciones forzadas Resonancia 31
1 10 Aplicaciones de la resonancia y lucha contra ella 35
1 11 Autooscilaciones 37
Ejemplos de resolución de problemas 39
Ejercicio 1 41
Breve resumen del capítulo 1 43

2. Oscilaciones eléctricas 45

2 1 Oscilaciones eléctricas libres y forzadas 45
2.2. Circuito oscilante 47
2.3 Analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas 48
2 4 Período de las oscilaciones eléctricas libres
Ecuación de definición de los procesos en el circuito oscilante 50
2 5 Corriente eléctrica alterna 53
2 6 Resistencia óhmica en un circuito de corriente alterna
Valor eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión 56

2 7 Capacidad en un circuito de corriente alterna 59
2 8 Inductancia en un circuito de corriente alterna 61
2.9 Resonancia en un circuito eléctrico 64
2 10 Lámpara electrónica de tres electrodos 68
2.11. Oscilador de lámpara 70
Ejemplos de resolución de problemas 71
Ejercicio 2 75
Breve resumen del capítulo 2 76

3. Producción, transmisión y utilización de la energía eléctrica 78

3 1 Generación de energía eléctrica 78
3 2. Transformador 81
3.3. Producción y utilización de la energía eléctrica 83
3.4. Transmisión de la energía eléctrica 87
3 5 Logros y perspectivas de la electrificación de la URSS 89
Ejercicio 3 90
Breve resumen del capítulo 3 91

4. Ondas mecánicas. Sonido 92

4.1 Fenómenos ondulatorios 92
4.2. Propagación de las ondas mecánicas 95
4 3 Longitud de onda. Velocidad de onda 97
4.4 Ondas en un medio 99
4 5 Ondas sonoras 101
4 6. Sonidos musicales y ruidos Intensidad y altura de un sonido 105
4 7 Resonancia acústica 107
4 8 Ultrasonido 107
4.9. Interferencia de ondas 109
4 10 Principio de Huygens. Ley de reflexión de las ondas 113
4 11 Difracción de las ondas 115
Ejercicio 4 117
Breve resumen del capítulo 4 117

5. Ondas electromagnéticas 119

5.1. Relación entre el campo eléctrico alterno y el campo magnético alterno 119
5 2. Campo electromagnético 120
5.3. Cómo se transmiten las interacciones electromagnéticas 122
5.4. Onda electromagnética 123
5 5 Emisión de las ondas electromagnéticas 125
5 6. A.S. Popov inventor de la radio 129
5.7. Principios básicos de la radiocomunicación 131
5 8. Cómo se efectúa la modulación y la detección 133

5.9. Propiedades de las ondas electromagnéticas 136
5.10. Propagación de las ondas hertzianas 138
5.11. Radiolocalización 139
5.12. Idea de la televisión 141
5.13 Desarrollo de los medios de comunicación en la URSS 143
Ejercicio 5 144
Breve resumen del capítulo 5 145

Óptica

Introducción 146

6. Optica geométrica 149

6.1 Propagación rectilínea de la luz 149
6.2. Fotometría Flujo luminoso Intensidad de la luz 151
6.3 Iluminación 153
Ejemplos de resolución de problemas 156
Ejercicio 6 157
6.4 Ley de la reflexión de la luz Construcción de la imagen en un espejo plano 158
Ejemplos de resolución de problemas 160
Ejercicio 7 161
6.5 Ley de la refracción de la luz 162
6.6 Reflexion total 166
Ejemplos de resolución de problemas 169
Ejercicio 8 171
6.7 Lente 171
6.8 Construcción de la imagen producida por una lente 176
6.9 Fórmula de la lente delgada Aumento de la lente 178
6.10. Camara fotográfica. Aparato de proyección 180
6.11 Ojo Lentes 182
6.12. Lupa. Microscopio 185
Ejemplos de resolucion de problemas 187
Ejercicio 9 188
Breve resumen del capítulo 6 189

7. Ondas luminosas 191

7.1 Velocidad de la luz 191
7.2. Deduccion de la ley de la refracción de la luz 193
7.3. Dispersión de la luz 195
7.4 Interferencia de la luz 197
7.5 Algunas aplicaciones de la interferencia 200
7.6 Difracción de la luz 207
7.7 Red de difracción 211

7 8 Carácter transversal de las ondas luminosas. Polarización de la luz 212
7 9 El carácter transversal de las ondas luminosas y la teoría electromagnética de la luz 216
Ejemplos de resolución de problemas 217
Ejercicio 10 218
Breve resumen del capítulo 7 219

8. Elementos de teoría de la relatividad 221

8.1. Leyes de la electrodinámica y principio de la relatividad 221
8 2. Postulados de la teoría de la relatividad 223
8.3. Relatividad de la simultaneidad 225
8.4. Consecuencias fundamentales que se deducen de los postulados de la teoría de la relatividad 227
8.5 Dependencia de la masa respecto de la velocidad Dinámica relativista 229
8 6. Sincrofasotrón 231
8 7 Relación entre la masa y la energía 233
Ejercicio 11 235
Breve resumen del capítulo 8 235

9. Radiación y espectros 237

9 1 Tipos de radiación. Fuentes de luz 237
9.2. Espectros y aparatos espectrales 239
9.3. Tipos de espectros 241
9.4. Análisis espectral 243
9.5. Radiación infrarroja y ultravioleta 245
9.6 Rayos X 246
9 7. Escala de las radiaciones electromagnéticas 249
Breve resumen del capítulo 9 250

Física cuántica

Introducción 252

10. Cuantos de luz. Acción de la luz 254

10.1. Efecto fotoeléctrico 254
10.2. Teoría del efecto fotoeléctrico 256
10 3 Fotones 258
10.4. Aplicaciones del efecto fotoeléctrico 259
10.5. Presión de la luz 261
10.6. Acción química de la luz. Fotografía 263
Ejercicio 12 265
Breve resumen del capítulo 10 265

11. Física atómica 267

11.1. Estructura del átomo. Experimentos de Rutherford 267
11.2. Postulados de Bohr 271
11.3. Modelo del átomo de hidrógeno según Bohr 273
11.4. Demostración experimental de la existencia de los estados estacionarios 276
11.5. Dificultades de la teoría de Bohr 278
11.6. Láseres 279
Ejercicio 13 282
Breve resumen del capítulo 11 283

12. Física del núcleo atómico 285

12.1. Núcleo atómico y partículas elementales 285
12.2. Métodos de observación y registro de las partículas elementales 285
12.3. Descubrimiento de la radiactividad 289
12.4. Rayos alfa, beta y gamma 291
12.5. Transiciones radiactivas 294
12.6. Ley de la desintegración radiactiva. Período de semidesintegración 296
12.7. Isótopos 298
12.8. Descubrimiento del neutrón 300
12.9. Estructura del núcleo atómico. Fuerzas nucleares 302
12.10. Energía de enlace de los núcleos atómicos 304
12.11. Reacciones nucleares 306
12.12. Fisión de los núcleos de uranio 308
12.13. Reacciones nucleares en cadena 310
12.14. Reactor nuclear 312
12.15. Reacciones termonucleares 315
12.16. Utilización de la energía nuclear 317
12.17. Obtención de isótopos radiactivos y sus aplicaciones 319
12.18. Acción biológica de las radiaciones radiactivas 322
Ejercicio 14 323
Breve resumen del capítulo 12 324

13. Partículas elementales 326

13.1. ¿Qué es una partícula elemental? 326
13.2. Descubrimiento del positrón. Antipartículas 328
13.3. Desintegración del neutrón. Descubrimiento del neutrino 330
13.4. ¿Cuántas partículas elementales existen? 332
Breve resumen del capítulo 13 335

Importancia de la física para explicar el mundo y el desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad

14.1 Interpretación física del mundo como un todo único 337
14.2. La física y la revolución científico-técnica 340
Trabajos de laboratorio 343

Respuestas a los ejercicios 348

Índice alfabético de nombres y materias 350

Oscilaciones y ondas

Introducción

Hasta ahora, al estudiar la física, hemos seguido determinado orden. En "Física 2" (Editorial MIR) se examinó el MOVIMIENTO MECÁNICO: la variación de las posiciones de los cuerpos (o de sus partes) entre sí en el espacio con el correr del tiempo. En "Física 3", al explicar la termodinámica y la física molecular, se dieron a conocer los procesos térmicos. La segunda mitad del curso de física mencionado se consagró a los FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS. Pero el estudio de la electrodinámica no fue culminado. Aún quedan por conocer procesos tan importantes como la corriente alterna, las ondas radioeléctricas (ondas electromagnéticas) y otros. No obstante, si se hojean las primeras páginas del libro que proponemos, puede verse que el curso de "Física 4" empieza otra vez por la mecánica, es decir, considerando las OSCILACIONES MECÁNICAS. Sólo después de esto se prosigue el estudio, no culminado en "Física 3", de la electrodinámica. La razón de esto reside en lo siguiente.

En "Física 2", además de dar a conocer las leyes generales de la mecánica, se dedicó mucho tiempo al estudio de diversos tipos particulares de movimiento mecánico, tales como el movimiento uniformemente acelerado y el movimiento circular. Pero nada se dijo de tipos tan importantes de movimiento mecánico como las OSCILACIONES y las ONDAS. Claro está que nadie se olvidó de ellas. Existen razones de peso para que las oscilaciones y las ondas de distinta naturaleza física (mecánicas y electromagnéticas) se estudien juntas.

Puede pensarse, ¿qué habrá común entre las oscilaciones de un péndulo ordinario y la descarga de un condensador a través de una bobina de inductancia? Y, sin embargo, sí lo hay. Pronto se verá que tanto las oscilaciones mecánicas como las electromagnéticas se subordinan a leyes cuantitativas totalmente iguales. Esto se pone de manifiesto si nos interesamos no por lo QUÉ oscila (un peso sujeto a un muelle o una corriente eléctrica en un circuito), sino por CÓMO se realizan las oscilaciones. También están sometidos a las mismas leyes los procesos ondulatorios de distinta naturaleza.

En la física moderna se destaca una parte especial, la FÍSICA DE LAS OSCILACIONES O VIBRACIONES. En ella se consideran desde un mismo punto de vista las oscilaciones de distinta naturaleza. La física de las oscilaciones tiene gran importancia práctica. Se ocupa de investigar las vibraciones de las máquinas y mecanismos, sus deducciones sirven de base a la electrotecnia de las corrientes alternas y a la radiotecnia.

1 OSCILACIONES MECÁNICAS

1.1. Oscilaciones libres y forzadas

Los movimientos oscilatorios, o simplemente oscilaciones, están muy extendidos en la naturaleza. Hacer que un objeto oscile es muy fácil.

Suspendamos un muelle de un soporte y sujetemos al extremo inferior del primero una bolita metálica. El muelle se alargará y la fuerza de elasticidad $\vec{F}_0$ equilibrará la fuerza de la gravedad $\vec{G}$ que actúa sobre la bolita (fig. 1,*a*). Si ahora la bolita se saca de su posición de equilibrio, tirando ligeramente de ella hacia abajo, y se suelta, empieza a realizar un movimiento muy interesante, de abajo arriba, de arriba abajo y así sucesivamente (fig 1,*b*). Este tipo de movimiento, en el cual un cuerpo se desplaza sucesivamente ora en un sentido ora en otro, se llama *oscilación*. Con el tiempo las oscilaciones se debilitan poco a poco (se amortiguan) y por fin la bolita se para.

Aún más sencillo es hacer que la bolita oscile si se suspende de un hilo. En la posición de equilibrio el hilo estará vertical y la fuerza de la gravedad G que actúa sobre la bolita será equilibrada por la fuerza de elasticidad $\vec{F}_0$ del hilo (fig. 2,*a*). Si la bolita se desvía hacia un lado y se suelta, empieza a balancearse de derecha a izquierda y de izquierda a derecha (fig 2,*b*), hasta que las oscilaciones se amortigüen. Una bolita suspendida de un hilo es un *péndulo* simple[1]. En general *suele llamarse péndulo un cuerpo suspendido por un hilo o sujeto a un eje, que puede oscilar bajo la acción de la fuerza de la gravedad.* El eje no debe pasar por el centro de gravedad del cuerpo. Puede darse el nombre de péndulo a una regla colgada de un clavo, a una lámpara colgante, a la cruz de una balanza de brazos iguales, etc.

¿Cuál es el rasgo más característico del movimiento oscilatorio? El que más salta a la vista es que durante las oscilaciones el movimiento del cuerpo SE REPITE o casi se repite. Así, el péndulo, después de realizar una oscilación, es decir, de recorrer el camino desde la posición extrema izquierda hasta la extrema derecha y viceversa, vuelve a efectuar este mismo movimiento. Si un movimiento se repite exactamente se dice que es *periódico.*

Las oscilaciones son movimientos que exacta o aproximadamente se repiten al cabo de intervalos de tiempo determinados.

Se repiten los movimientos de los émbolos del motor de un automóvil, los

[1] Debe tenerse en cuenta que la bolita suspendida por el hilo solo será un péndulo si sobre ella actúa la fuerza de la gravedad. El globo terráqueo que crea esta fuerza forma parte del sistema oscilante que, para abreviar, llamamos simplemente péndulo.

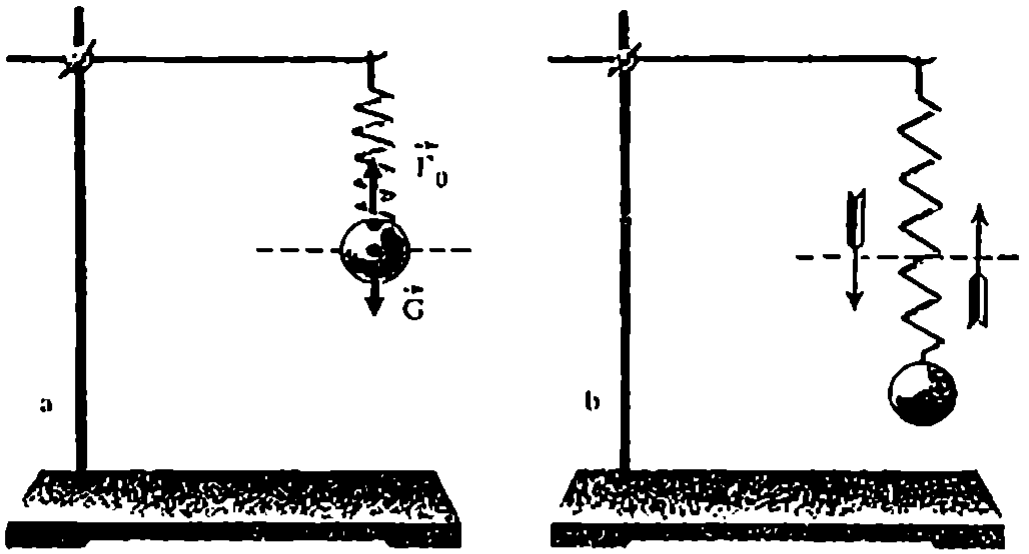


Fig. 1

de un flotador sobre las olas, los de las ramas de un árbol movidas por el viento, los de nuestro corazón. Todos estos movimientos son ejemplos de distintas oscilaciones.

OSCILACIONES LIBRES. El grupo de cuerpos, cuyo movimiento analizamos, se llama en mecánica *sistema de cuerpos* o simplemente *sistema*. Las fuerzas que actúan entre los cuerpos de un sistema se denominan *internas*. El nombre de *fuerzas exteriores* se da a las que actúan sobre los cuerpos del sistema por parte de cuerpos que no pertenecen a este.

La forma más simple de oscilaciones es la que se produce en un sistema bajo la acción de las fuerzas internas, una vez que el sistema ha sido sacado de su posición de equilibrio. Estas oscilaciones se llaman *libres*. Las oscilaciones de

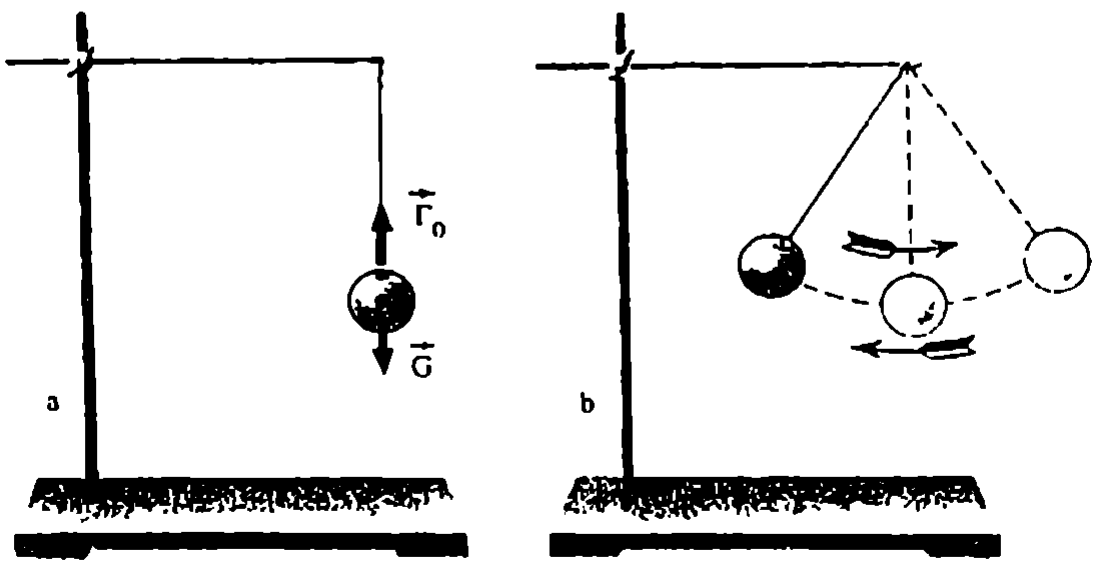


Fig. 2

un cuerpo sujeto a un muelle o de un cuerpo suspendido por un hilo son ejemplos de oscilaciones libres. Una vez que estos sistemas se sacan de sus posiciones de equilibrio, se crean unas condiciones en las cuales los cuerpos oscilan sin que sobre ellos actúen fuerzas exteriores variables periódicamente

OSCILACIONES FORZADAS. Si con la mano empezamos a mover un libro empujándole hacia adelante y hacia atrás por una mesa, él realizará oscilaciones, pero éstas no serán libres Las oscilaciones del libro en este caso se deberán a la acción de la fuerza, de módulo y sentido variables, que desarrollamos con la mano.

Las oscilaciones que realizan los cuerpos por la acción de fuerzas exteriores variables periódicamente se denominan *forzadas*.

Son oscilaciones forzadas, en particular, las de los émbolos en los cilindros de los motores de combustión interna, las de la aguja de una máquina de coser, etc.

1.2. Condiciones necesarias para que se produzcan oscilaciones libres

Veamos qué propiedades debe tener un sistema para que puedan producirse en él oscilaciones libres Lo más conveniente es considerar las oscilaciones de una bolita a lo largo de una línea horizontal bajo la acción de la fuerza de elasticidad de un muelle (fig. 3)[1]

Si la bolita se desplaza de su posición de equilibrio (fig. 3, *a*) hacia la derecha, la longitud del muelle aumenta en x_m (fig. 3, *b*) y sobre la bolita empieza a actuar la fuerza de elasticidad debida al muelle. Esta fuerza, según la ley de Hooke, es proporcional a la deformación del muelle y está dirigida hacia la izquierda. Bajo la acción de la fuerza de elasticidad, la bolita comienza a moverse aceleradamente hacia la izquierda y su velocidad aumenta. La fuerza de elasticidad irá disminuyendo, ya que la deformación del muelle va siendo menor En el instante en que la bolita llega a la posición de equilibrio, la fuerza de la elasticidad del muelle se anula. Por consiguiente, de acuerdo con la segunda ley de Newton, también se anula la aceleración de la bolita.

En este instante la velocidad de dicha bolita alcanza su valor máximo Por eso, en virtud de la inercia, la bolita no se para en la posición de equilibrio, sino que sigue moviéndose hacia la izquierda Al ocurrir esto, el muelle se acorta. Como resultado aparece una fuerza de elasticidad, dirigida hacia la derecha, que frena el movimiento de la bolita (fig. 3, *c*). Esta fuerza y, por consiguiente, el módulo de la aceleración dirigida hacia la derecha aumentan, en proporción directa al módulo de la elongación o desplazamiento x de la bolita respecto de su posición de equilibrio La velocidad, a su vez, va disminuyendo hasta que al llegar a la posición extrema izquierda se anula. Luego la bolita empieza a moverse aceleradamente hacia la derecha. Al disminuir el módulo de la

[1] El análisis de las oscilaciones de una bolita sujeta a un muelle vertical es algo más complicado. En este caso actúan simultáneamente la fuerza variable de la elasticidad del muelle y la fuerza constante de la gravedad. No obstante, el carácter de las oscilaciones en uno y otro caso es exactamente el mismo

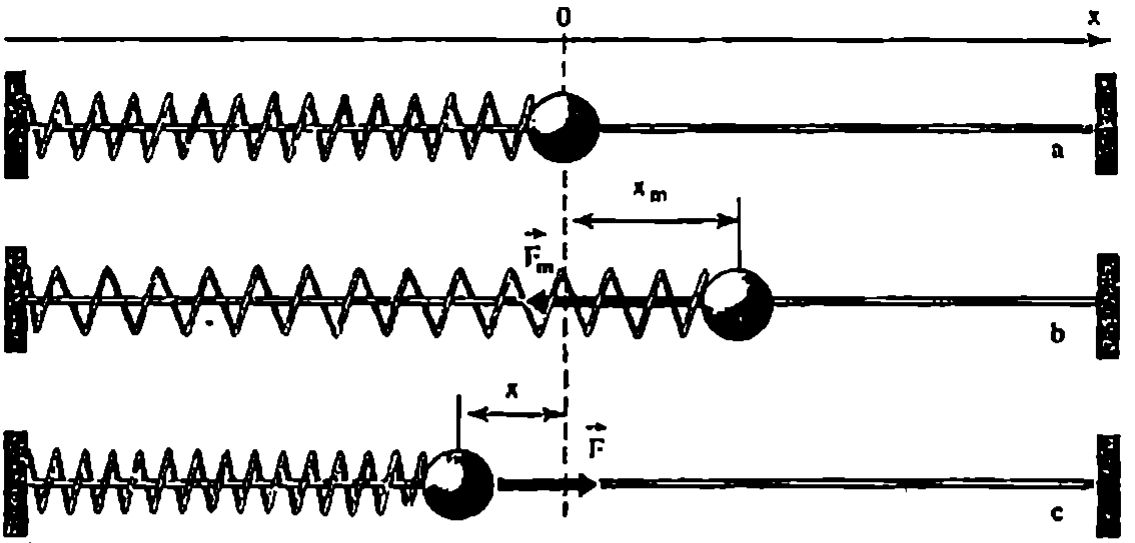


Fig. 3

elongación x, disminuye también el módulo de la fuerza $\vec{F}$ y en la posición de equilibrio vuelve a anularse. Pero la bolita, en este instante, ha tenido tiempo de adquirir velocidad y, por lo tanto, continúa moviéndose hacia la derecha. Este movimiento ocasiona el alargamiento del muelle y la aparición de la fuerza de elasticidad, dirigida hacia la izquierda. El movimiento de la bolita se va decelerando hasta que ésta se pare en la posición extrema derecha, después de lo cual se repite el proceso.

Si no existiera rozamiento, el movimiento de la bolita nunca cesaría. Pero el rozamiento existe (en particular por la resistencia del aire) y el sentido de la fuerza de resistencia es siempre contrario al de la velocidad, tanto cuando la bolita se mueve hacia la derecha, como cuando lo hace hacia la izquierda Por eso el rozamiento frena el movimiento de la bolita y la elongación de sus oscilaciones va disminuyendo poco a poco, hasta que dicho movimiento cesa Cuando el rozamiento es pequeño, la amortiguación sólo se nota al cabo de muchas oscilaciones Y si nos interesa el movimiento de la bolita durante un intervalo de tiempo no muy grande, el amortiguamiento de sus oscilaciones se puede despreciar. En este caso la fuerza de resistencia al movimiento puede no tomarse en consideración

Para que el rozamiento sea menor, cuando la bolita oscila a lo largo de una horizontal, se utiliza el dispositivo representado en la fig. 4 La bolita está sujeta, por medio de una varilla, a la abrazadera de una polea que puede rodar

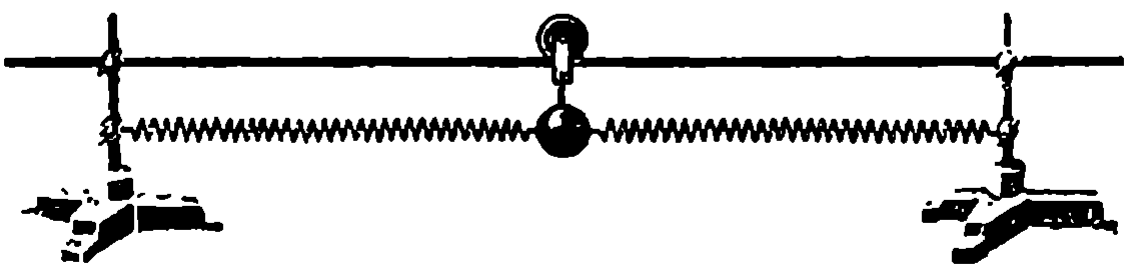


Fig. 4

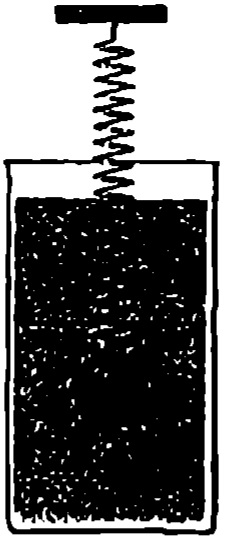


Fig. 5

con poco rozamiento a lo largo de una barra guía. La fuerza de la gravedad que actúa sobre la bolita es compensada en todo momento por la fuerza de elasticidad de la varilla. Las oscilaciones de la bolita se efectúan bajo la acción de las fuerzas de elasticidad de dos muelles

Si la fuerza de resistencia es grande, su acción, incluso en pequeños intervalos de tiempo, no se puede despreciar Para cerciorarse, sumerja una bolita suspendida por un muelle en un vaso lleno de líquido viscoso, por ejemplo, glicerina (fig. 5). Si el muelle es suficientemente blando, verá que la bolita, separada de su posición de equilibrio hacia abajo, no oscilará en absoluto Bajo la acción de la fuerza de elasticidad se limitará a retornar a la posición de equilibrio (línea de trazos en la fig. 5) A causa de la acción de la fuerza de resistencia, su velocidad en la posición de equilibrio será prácticamente nula.

Ahora ya se puede comprender qué es lo esencial para que en un sistema puedan producirse oscilaciones libres. Deben cumplirse dos condiciones PRIMERA, al desplazar el cuerpo de su posición de equilibrio, en el sistema debe surgir una fuerza dirigida hacia dicha posición y, por lo tanto, tendente a volver el cuerpo a ella. Así, precisamente, actuaba el muelle en el sistema antes examinado: tanto cuando la bolita se desplazaba hacia la izquierda, como cuando lo hacía hacia la derecha, la fuerza de elasticidad estaba dirigida hacia la posición de equilibrio. SEGUNDA, el rozamiento debe ser suficientemente pequeño en el sistema De lo contrario las oscilaciones se amortiguan rápidamente o incluso no se generan. Las oscilaciones no amortiguadas sólo son posibles en ausencia de rozamiento.

Estas dos condiciones son totalmente generales, válidas para todo sistema en el cual puedan aparecer oscilaciones libres. Vamos a comprobar esto en otro sistema simple, en el péndulo.

1.3. Péndulo simple

Consideremos un pendulo simple, es decir, una bolita pesada suspendida por un hilo largo. Si las dimensiones de la bolita son mucho menores que la longitud del hilo, dichas dimensiones pueden

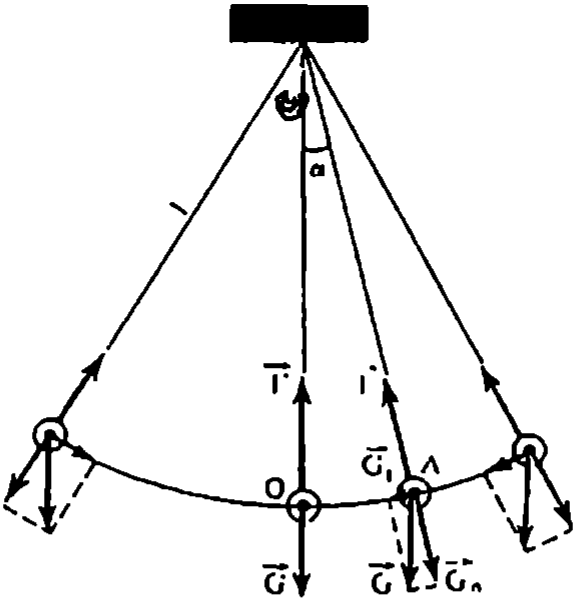


Fig. 6

despreciarse y considerar la bolita como un punto material. El alargamiento del hilo también se puede omitir, ya que será muy pequeño. Asimismo es posible no tomar en consideración la masa del hilo, por su pequeñez en comparación con la de bolita. Por lo tanto, en vez de un péndulo real, o sea, de una bolita de dimensiones determinadas suspendida por un hilo que, por supuesto, se deforma un poco durante el movimiento y que tiene masa, podemos con pleno derecho estudiar el modelo simplificado: un punto material suspendido por un hilo inextensible y carente de peso. Este modelo de péndulo recibe el nombre de *péndulo simple* o *matemático*. Una bolita pequeña suspendida por un hilo fino y largo debe comportarse prácticamente como un péndulo simple. Saquemos este péndulo de su posición de equilibrio y soltémoslo. Sobre la bolita actuarán dos fuerzas: la de la gravedad $\vec{G} = m\vec{g}$, dirigida verticalmente hacia abajo, y la de la elasticidad del hilo $\vec{F}$, dirigida a lo largo de éste (fig. 6). Es natural que al moverse el péndulo actuará también sobre él la fuerza de la resistencia. Pero vamos a suponer que esta última es tan pequeña que se puede despreciar.

Para imaginarse claramente la dinámica del movimiento del péndulo conviene descomponer la fuerza de la gravedad en dos componentes: la $\vec{G}_n$, dirigida a lo largo del hilo, y la $\vec{G}_t$, dirigida perpendicularmente al hilo, según la tangente a la trayectoria de la bolita. La fuerza de elasticidad del hilo $\vec{F}$ y la componente $\vec{G}_n$ de la fuerza de la gravedad son perpendiculares a la velocidad del péndulo y le comunican una aceleración centrípeta. Esta aceleración está dirigida hacia el centro de un arco de circunferencia, es decir, de la trayectoria del péndulo. El trabajo de estas fuerzas es nulo. Por eso, de acuerdo con el teorema de la energía cinética, no hacen que varíe el módulo de la velocidad del péndulo. Su acción se limita a hacer que el vector velocidad cambie continuamente de dirección, de manera que en todo instante la velocidad tenga la dirección de la tangente al arco de circunferencia. Bajo la acción de la componente $\vec{G}_t$, el péndulo comienza a moverse hacia abajo, siguiendo el arco de circunferencia, con una velocidad cuyo módulo va aumentando. A medida que el péndulo se mueve, el módulo de esta componente de la fuerza de la gravedad, dirigida

2 [illegible]

hacia la posición de equilibrio, disminuye y, en el instante en que el pendulo pasa por dicha posición, se anula. Por efecto de la inercia, el péndulo sigue moviéndose y se eleva. Ahora la componente $\vec{G}_t$, estará dirigida en sentido contrario al de la velocidad. Por lo tanto, el módulo de la velocidad del péndulo irá disminuyendo, además tanto más de prisa, cuanto mayor sea el ángulo entre el hilo y la vertical, ya que, a medida que aumenta este ángulo, dicha componente de la fuerza de la gravedad crece En el instante en que el péndulo se detiene en el punto más alto, el módulo de la componente $\vec{G}_t$ es máximo y dicha componente está dirigida hacia la posición de equilibrio Después el módulo de la velocidad aumenta y el péndulo vuelve a moverse hacia dicha posición. Una vez que pasa la posición de equilibrio, el péndulo retorna a su punto de partida, si es que la fuerza de la resistencia no es grande y su trabajo durante un pequeño intervalo de tiempo puede despreciarse. Si el péndulo se sumerge en un liquido viscoso se nota inmediatamente que las oscilaciones se interrumpen o se amortiguan con rapidez.

¿ ?

1. ¿Qué oscilaciones se llaman libres? Pongan algunos ejemplos de oscilaciones libres no mencionados en el texto.
2. ¿Qué oscilaciones se denominan forzadas? Cite algunos ejemplos de oscilaciones forzadas.
3. ¿En qué condiciones se producen oscilaciones libres en un sistema?

1.4. Dinámica del movimiento oscilatorio

ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN CUERPO OSCILANTE BAJO LA ACCIÓN DE FUERZAS DE ELASTICIDAD. Para definir cuantitativamente el proceso de las oscilaciones de un cuerpo bajo la acción de fuerza de elasticidad de un muelle o las oscilaciones de una bolita suspendida por un hilo, hay que aplicar las leyes de la mecánica de Newton.

De acuerdo con la segunda ley de Newton, el producto de la masa m del cuerpo por su aceleración $\vec{a}$ es igual a la resultante $\vec{F}$ de todas las fuerzas aplicadas al cuerpo:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \tag{1.1}$$

Escribamos la ecuación del movimiento para una bolita que se mueva rectilineamente a lo largo de una horizontal bajo la acción de un muelle (véase la fig. 3). El eje X lo dirigimos hacia la derecha y suponemos que el origen de coordenadas corresponde a la posición de equilibrio (véase la fig. 3, *a*).

El movimiento a lo largo del eje X viene determinado por la proyección F_x sobre esta dirección, de la fuerza de elasticidad $\vec{F}$ del muelle Esta proyección, de acuerdo con la ley de Hooke, es directamente proporcional a la elongación o desplazamiento de la bolita de su posición de equilibrio. La elongación es igual a la coordenada x de la bolita, con la particularidad de que la proyección de la fuerza y la coordenada tienen signos opuestos (véanse las figs. 3, *b* y *c*) Por consiguiente,

$$F_x = -kx, \tag{1.2}$$

donde k es la rigidez del muelle.

La ecuación del movimiento de la bolita se escribe así:

$$ma_x = -kx, \tag{1.3}$$

siendo a_x la proyección de la aceleración sobre la dirección del eje X. Dividiendo por m los dos miembros de la ecuación (1.3), se obtiene:

$$a_x = -\frac{k}{m}x \tag{1.4}$$

Como la masa m y la rigidez k son magnitudes constantes, la relación k/m también lo es. Hemos obtenido la ecuación del movimiento de un cuerpo que oscila bajo la acción de la fuerza de elasticidad. Esta ecuación es muy simple: la proyección a_x de la aceleración del cuerpo es directamente proporcional a su coordenada x tomada con signo contrario.

Lo más notable es que ecuaciones iguales a ésta definen las oscilaciones libres de los más diversos sistemas.

ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL PÉNDULO SIMPLE. Cuando una bolita oscila suspendida por un hilo inextensible, siempre se mueve siguiendo un arco de circunferencia, cuyo radio es igual a la longitud l del hilo. Por eso la posición de la bolita en todo instante queda determinada por una sola magnitud, la elongación, o sea, el ángulo α de desviación del hilo respecto de la vertical. Vamos a considerar que el ángulo α es positivo si el péndulo está desviado hacia la derecha de la posición de equilibrio, y negativo, si lo está hacia la izquierda (véase la fig. 6).

Llamemos G_t a la proyección de la fuerza de la gravedad sobre la tangente a la trayectoria del péndulo. Esta proyección en el instante en que el hilo está desviado de la posición de equilibrio un ángulo α se expresa así:

$$G_t = -G \operatorname{sen} \alpha = -mg \operatorname{sen} \alpha. \tag{1.5}$$

Aquí el signo " $-$ " figura porque G_t y α tienen signos opuestos. Cuando el péndulo se desvía hacia la derecha ($\alpha > 0$), la componente G_t de la fuerza de la gravedad está dirigida hacia la izquierda y su proyección es negativa: $G_t < 0$. Cuando el péndulo se desvía hacia la izquierda ($\alpha < 0$) y dicha proyección es positiva: $G_t > 0$.

Designemos la proyección de la aceleración del péndulo sobre la tangente a su trayectoria por a_t. Esta proyección caracteriza la rapidez con que varía el módulo de la velocidad del péndulo. Esto ya se dijo en el 1.3.

De acuerdo con la segunda ley de Newton

$$ma_t = G_t,$$

o bien

$$ma_t = -mg \operatorname{sen} \alpha. \tag{1.6}$$

Dividiendo por m los dos miembros de esta ecuación, se obtiene:

$$a_t = -g \operatorname{sen} \alpha. \tag{1.7}$$

Hasta ahora se ha supuesto que las elongaciones, es decir, los ángulos de desviación del hilo del péndulo respecto de la vertical, podían ser cualesquiera. En adelante vamos a considerarlos pequeños. Cuando los ángulos son

pequeños, si se miden en radianes,

$$\operatorname{sen}\alpha \approx \alpha$$

Por lo tanto, se puede admitir que

$$a_t = -g\alpha. \tag{1.8}$$

Designando la longitud del arco OA por s (véase la fig. 6), se puede escribir:

$$s = \alpha l,$$

de donde

$$\alpha = \frac{s}{l}. \tag{1.9}$$

Sustituyendo α por esta expresión en la igualdad (1.8), resulta.

$$a_t = -\frac{g}{l}s. \tag{1.10}$$

Esta ecuación tiene la misma forma que la (1.4) del movimiento de la bolita sujeta al muelle. Sólo que aquí, en vez de la proyección de la aceleración a_x, figura la proyección de la aceleración a_t y, en vez de la coordenada x, la magnitud s. Además, el coeficiente de proporcionalidad no depende ya de la rigidez del muelle y de la masa de la bolita, sino de la aceleración de caída libre y de la longitud del hilo. Pero, lo mismo que antes, la aceleración es directamente proporcional a la elongación (determinada por el arco) de la bolita

Hemos llegado a una conclusión sorprendente: las ecuaciones del movimiento que definen las oscilaciones de sistemas tan distintos como una bolita sujeta a un muelle y un péndulo, son iguales Esto significa que el movimiento de la bolita y las oscilaciones del péndulo transcurren de igual modo Las elongaciones de la bolita sujeta al muelle y de la bolita del péndulo varían con el tiempo según una misma ley, a pesar de que las fuerzas que producen las oscilaciones tienen distinta naturaleza física En el primer caso se trata de la fuerza de elasticidad del muelle y en el segundo, de la componente de la fuerza de la gravedad.

La ecuación del movimiento (1.4), lo mismo que la (1.10), exteriormente parece muy simple: la aceleración es directamente proporcional a la coordenada. Pero resolverla, es decir, determinar cómo varía la posición del cuerpo oscilante en el espacio con el tiempo, no es fácil. En "Física 2" se estudió el movimiento uniformemente acelerado. Pero en las oscilaciones la aceleración varía con el tiempo, ya que cambia la fuerza que sobre el cuerpo actúa.

1.5. Oscilaciones armónicas

Sabiendo cómo están relacionadas entre sí la aceleración y la coordenada del cuerpo oscilante, se puede, basándose en el análisis matemático, hallar la dependencia de la coordenada respecto del tiempo.

LA ACELERACIÓN ES LA SEGUNDA DERIVADA DE LA COORDENADA RESPECTO DEL TIEMPO. La velocidad instantánea, como se sabe por el curso de matemáticas, es la derivada de la coordenada respecto del tiempo. La aceleración es, pues, la derivada de la velocidad respecto del tiempo o la segunda derivada de la coordenada respecto del tiempo[1]. Por lo tanto, la ecuación (1.4), que define las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, se puede escribir así:

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m}x, \qquad (1.11)$$

donde $\ddot{x}$ es la segunda derivada de la coordenada respecto del tiempo. De acuerdo con la ecuación (1.11), cuando las oscilaciones son libres, la coordenada x varía con el tiempo de tal manera, que su segunda derivada respecto del tiempo es directamente proporcional a la propia coordenada y tiene signo contrario al de ella.

OSCILACIONES ARMÓNICAS. Por el curso de matemáticas se sabe que las funciones seno y coseno tienen la propiedad de que la segunda derivada de la función es proporcional a la propia función tomada con signo contrario. Puede demostrarse que ninguna otra función posee esta propiedad. Por consiguiente, la coordenada de un cuerpo que efectúa oscilaciones libres varía con el tiempo según la ley del seno o del coseno.

Cuando un cuerpo oscila, su movimiento se repite periódicamente. Por eso no es extraño que la variación con el tiempo de la coordenada del cuerpo se exprese por medio de un seno o de un coseno, que son funciones periódicas.

Las variaciones periódicas de una magnitud física, dependientes del tiempo, que se producen de acuerdo con la ley del seno o del coseno, se llaman oscilaciones armónicas.

Primero vamos a estudiar las variaciones armónicas de una coordenada. Después se darán a conocer las variaciones armónicas de otras magnitudes.

AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES. Una característica importante del movimiento oscilatorio es la amplitud.

Se llama amplitud de las oscilaciones armónicas el módulo de su elongación máxima, o sea, del desplazamiento máximo del cuerpo de su posición de equilibrio.

La amplitud puede tener distintos valores, en dependencia de la magnitud en que se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio en el instante inicial y de la velocidad que se le comunica. La amplitud se determina por las condiciones iniciales. Pero los valores máximos del módulo del seno y del coseno son iguales a la unidad. Por lo tanto, la solución de la ecuación (1.11) no se puede expresar simplemente por un seno o un coseno. Debe tener la forma de producto de la amplitud x_m por un seno o un coseno, que deberán ser funciones del tiempo.

SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO QUE DESCRIBE LAS OSCILACIONES LIBRES. ¿Qué forma tiene la solución de la ecuación (1.11)? No puede pensarse que sea simplemente $x = x_m \cos t$ o $x =$

---

[1] Para abreviar, decimos aceleración y velocidad. En realidad nos referimos a las proyecciones de estas magnitudes vectoriales.

$= x_m$ sen t, ya que en este caso, en vez de

$$x'' = -\frac{k}{m}x,$$

se obtendría la igualdad

$$x'' = -x_m \cos t = -x$$

Pero una pequeña complicación de la forma de esta solución nos conduce al fin deseado. Para que en la expresión de la segunda derivada $x''(t)$ figure el factor k/m, escribiremos la solución de la ecuación (1.11) en la forma siguiente:

$$x = x_m \cos \sqrt{\frac{k}{m}}\, t. \tag{1.12}$$

En este caso la primera derivada tomará la forma.

$$x' = -\sqrt{\frac{k}{m}}\, x_m \operatorname{sen} \sqrt{\frac{k}{m}}\, t,$$

y la segunda derivada será

$$x'' = -\frac{k}{m} x_m \cos \sqrt{\frac{k}{m}}\, t = -\frac{k}{m} x.$$

Hemos obtenido exactamente la ecuación (1.11). Por consiguiente, la función (1.12) es una solución de la ecuación inicial (1.11). Naturalmente, también será solución de dicha ecuación la función

$$x = x_m \operatorname{sen} \sqrt{\frac{k}{m}}\, t.$$

Designemos la magnitud constante $\sqrt{\frac{k}{m}}$, dependiente de las propiedades del sistema, por ω_0:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{1.13}$$

Entonces la solución de la ecuación (1.11) se puede escribir en forma más compacta:

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \tag{1.14}$$

Mientras que la propia ecuación del movimiento (1.11) toma la forma

$$\underline{\underline{x'' = -\omega_0^2 x.}} \tag{1.15}$$

La gráfica de la dependencia de la coordenada del cuerpo respecto del tiempo, de acuerdo con (1.14), es la cosinusoide representada en la fig. 7.

PERÍODO Y FRECUENCIA DE LAS OSCILACIONES ARMÓNICAS. Veamos ahora qué sentido físico tiene la magnitud ω_0.

Durante las oscilaciones el movimiento del cuerpo se repite periódicamente.

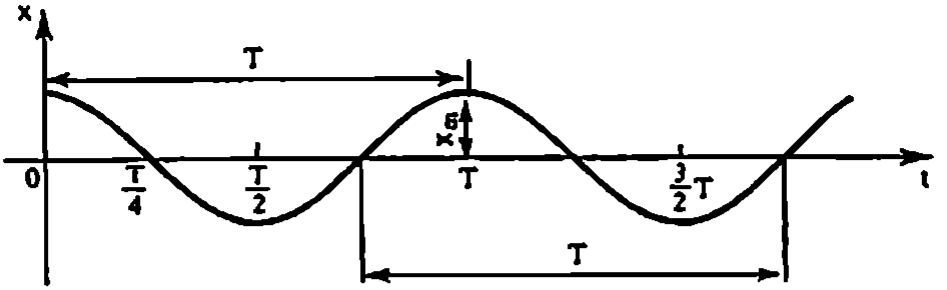


Fig. 7

El *intervalo de tiempo mínimo* T al cabo del cual el movimiento del cuerpo se repite totalmente se denomina *período de las oscilaciones.*

Conociendo el período se puede determinar la *frecuencia de las oscilaciones*, es decir, el número de oscilaciones por unidad de tiempo, por ejemplo, en un segundo. Si la oscilación se cumple en un tiempo T, el número de oscilaciones por segundo ν se determina así:

$$\nu = \frac{1}{T} \tag{1.16}$$

En el sistema internacional de unidades (SI) la frecuencia de las oscilaciones es igual a la unidad si en un segundo se efectúa una oscilación. La unidad de medida de la frecuencia se llama HERTZIO o HERCIO (Hz) en honor del físico alemán Heinrich HERTZ.

Al cabo de un intervalo de tiempo igual al período T, es decir, cuando el argumento del coseno aumenta en $\omega_0 t$, el movimiento se repite y el coseno toma su valor de antes. Pero por las matemáticas sabemos que el período mínimo del coseno es igual a 2π. Por lo tanto,

$$\omega_0 T = 2\pi,$$

de donde

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \tag{1.17}$$

Así, pues, la magnitud ω_0 es el número de oscilaciones del cuerpo, pero no en un segundo, sino en 2π segundos. Esta magnitud recibe el nombre de *frecuencia angular* o *cíclica*[1].

La frecuencia de las oscilaciones libres se llama *frecuencia propia (o natural) del sistema oscilante*.

DEPENDENCIA DE LA FRECUENCIA Y DEL PERÍODO DE LAS OSCILACIONES LIBRES DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA. La frecuencia propia de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, según

[1] En adelante, para abreviar, llamaremos a menudo simplemente frecuencia a la frecuencia angular. Esta frecuencia ω se podrá distinguir de la frecuencia ν por las letras griegas que las designan.

(1.13), es

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Esta frecuencia resulta tanto mayor cuanto mayor es la rigidez del muelle, y tanto menor, cuanto mayor es la masa del cuerpo Eso es natural: el muelle rígido comunica al cuerpo una aceleración mayor y la velocidad de éste varía con más rapidez. Y cuanto más masa tiene el cuerpo, tanto más despacio varía su velocidad bajo la influencia de una fuerza dada El período de las oscilaciones es

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (1.18)$$

Si se dispone de un juego de muelles de distinta rigidez y de cuerpos de distinta masa, no es difícil cerciorarse de que las fórmulas (1.13) y (1.18) definen correctamente el carácter de la dependencia de ω_0 y T respecto de k y m.

El coeficiente de proporcionalidad entre la aceleración a_t y la elongación s en la ecuación (1.10), que define las oscilaciones del péndulo, es, lo mismo que en la ecuación (1.11), el cuadrado de la frecuencia angular. Por consiguiente, la frecuencia propia del péndulo simple, cuando los ángulos que forma el hilo con la vertical son pequeños, depende de la longitud del péndulo y de la aceleración de caída libre así:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \qquad (1.19)$$

Y el período de las oscilaciones es

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (1.20)$$

Esta fórmula la obtuvo por primera vez y la comprobó el científico holandés, contemporáneo de NEWTON, Christian HUYGENS

El período de las oscilaciones crece al aumentar la longitud del péndulo De la masa del péndulo no depende el período. Esto se puede comprobar fácilmente haciendo experimentos con péndulos distintos. La dependencia del período respecto de la aceleración de caída libre también puede detectarse Cuanto menor sea g, tanto mayor será el período de las oscilaciones del péndulo y, por consiguiente, tanto más despacio marcharán los relojes de péndulo. Así, un reloj de péndulo en forma de lenteja, sujeta a una varilla, sufriría un retraso de 3 s diarios si desde el sótano de la Universidad de Moscú lo elevamos a su último piso (que está a 200 m de altura). Esto únicamente ocurriría a costa de la disminución de la aceleración de caída libre con la altura

La dependencia entre el período de las oscilaciones del péndulo y el valor de g se aprovecha en la práctica. Midiendo el período de las oscilaciones se puede determinar g con mucha exactitud. La aceleración de caída libre, como se sabe por el curso de "Física 2", varía con la latitud geográfica. Pero incluso en una

latitud dada tampoco es igual en todas partes, ya que la densidad de la corteza terrestre no es la misma en todos los puntos. En las regiones en que yacen rocas densas la aceleración g es algo mayor. Esto se aplica en la prospección de minerales.

Así, el mineral de hierro es más denso que las rocas ordinarias. Por eso las mediciones de la aceleración de caída libre, efectuadas bajo la dirección del académico soviético A.A MIJÁILOV en las inmediaciones de la ciudad de Kursk, dieron la posibilidad de precisar la ubicación de los importantes yacimientos de hierro de esta zona. Estos yacimientos fueron descubiertos anteriormente por medio de mediciones magnéticas

Es notable que el período de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle y el período de las oscilaciones del péndulo, cuando sus elongaciones son pequeñas, no dependan de la amplitud de dichas oscilaciones. Intuitivamente podemos imaginarnos esto como sigue. Si la amplitud se duplica, la fuerza dirigida hacia la posición de equilibrio también se duplica, la aceleración se hace dos veces mayor y el valor de la velocidad adquirida será doble. Como resultado, el camino dos veces más largo hacia la posición de equilibrio del cuerpo será recorrido en el mismo tiempo que durante las oscilaciones con la amplitud inicial (dos veces menor)

1.6. Fase de las oscilaciones

Conocemos ya las principales magnitudes que caracterizan las oscilaciones armónicas: la amplitud x_m de las oscilaciones, el período T, la frecuencia ν y la frecuencia angular ω_0 Nos queda por conocer otra magnitud importante, la *fase*.

Cuando se da la amplitud de las oscilaciones armónicas, la coordenada del cuerpo oscilante en un instante cualquiera viene determinada unívocamente por el argumento del coseno (o del seno) $\varphi = \omega_0 t$.

La magnitud φ, que se encuentra detrás del signo de coseno o de seno, recibe el nombre de fase de las oscilaciones definidas por estas funciones. La fase se mide en unidades angulares, radianes.

La fase no sólo determina el valor de la coordenada, sino además el de otras magnitudes físicas, como la velocidad y la aceleración, que varían también de acuerdo con la ley armónica. Por eso se puede decir que la fase define, cuando se da la amplitud, el estado del sistema oscilante en cualquier momento.

Como $\omega_0 = \dfrac{2\pi}{T}$, obtenemos

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \qquad (1.21)$$

La relación t/T indica la fracción de período transcurrida desde el instante en que se iniciaron las oscilaciones. *A todo valor del tiempo expresado en fracciones de período le corresponde un valor de la fase expresado en radianes.* Así, al cabo de un tiempo $t = T/4$ (cuarto de período), $\varphi = \pi/2$; transcurrido medio período, $\varphi = \pi$; después de un período completo, $\varphi = 2\pi$ y así sucesivamente

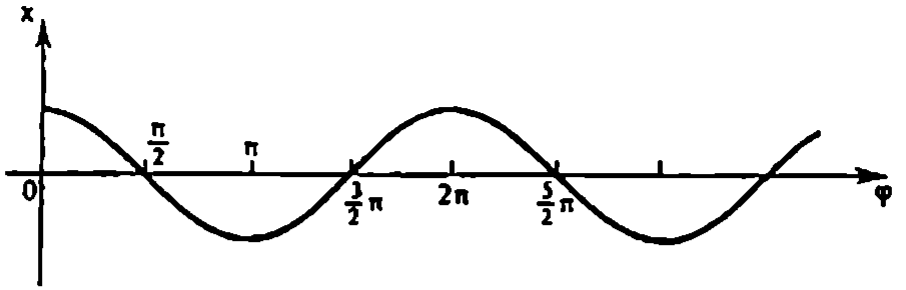


Fig. 8

En una gráfica se puede representar la coordenada de un punto oscilante no en función del tiempo, sino de la fase. En la fig. 8 se muestra la misma cosinusoide que en la fig. 7, pero sobre el eje horizontal, en vez del tiempo, se han tomado distintos valores de la fase φ.

ESCRITURA DE LAS OSCILACIONES ARMÓNICAS POR MEDIO DEL COSENO Y DEL SENO Sabemos que, cuando las oscilaciones son armónicas, la coordenada del cuerpo varía con el tiempo según la ley del seno o del coseno. Después de introducir el concepto de fase hay que detenerse en esto y analizarlo más detalladamente.

El seno se diferencia del coseno en que el argumento está desplazado un cuarto de período es decir, en $\pi/2$

$$\cos\varphi = \operatorname{sen}\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (1\ 22)$$

Por esta razón, en vez de la fórmula $x = x_m \cos\omega_0 t$, para describir las oscilaciones armónicas se puede utilizar la fórmula

$$x = x_m \operatorname{sen}\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) \qquad (1.23)$$

Pero entonces la *fase inicial*, o sea, el valor de la fase en el instante $t = 0$, no es nulo, sino igual a $\pi/2$.

Por lo general las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, o de un péndulo, se excitan sacándolo de su posición de equilibrio y soltándolo. En el instante inicial la elongación es máxima. Por lo tanto, para definir estas oscilaciones es más conveniente utilizar la fórmula (1.14), aplicando el coseno, que la fórmula (1 23), utilizando el seno.

Pero si las oscilaciones del cuerpo en reposo se excitan por medio de un choque de poca duración, la coordenada en el instante inicial será nula y sus oscilaciones convendrá describirlas mediante el seno, es decir, con la fórmula

$$x = x_m \operatorname{sen}\omega_0 t, \qquad (1.24)$$

ya que en este caso la fase inicial es nula

DESPLAZAMIENTO DE FASE. Las oscilacinnes definidas por las fórmulas (1.23) y (1.24) sólo difieren entre sí por sus fases. *La diferencia de fase*, o como suele decirse, *el desplazamiento de fase*, o defasaje, de estas oscilaciones

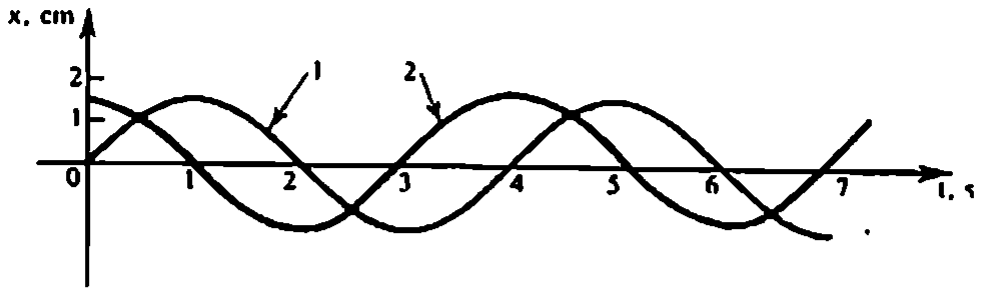


Fig. 9

es $\pi/2$. La fig. 9 muestra las gráficas de las coordenadas en función del tiempo de dos oscilaciones armónicas con un desplazamiento de fase de $\pi/2$. La gráfica 1 corresponde a las oscilaciones que se realizan según la ley sinusoidal

$$x = x_m \operatorname{sen} \omega_0 t,$$

y la gráfica 2, a las oscilaciones efectuadas de acuerdo con la ley cosinusoidal

$$x = x_m \operatorname{sen}\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = x_m \cos \omega_0 t.$$

Para determinar la diferencia de fase de dos oscilaciones hay que expresar en ambos casos la magnitud oscilante por medio de la misma función trigonométrica ya sea el seno o bien el coseno

¿ ?

1. ¿Qué oscilaciones se llaman armónicas?
2. ¿Cómo están relacionadas la aceleración y la coordenada en las oscilaciones armónicas?
3. ¿Cómo está relacionada la frecuencia angular de las oscilaciones con el período?
4. ¿Por qué la frecuencia de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle depende de la masa del primero, mientras que la frecuencia de las oscilaciones del péndulo no depende de ella?
5. La coordenada de un cuerpo, medida en centímetros, varía con el tiempo del modo siguiente: $x = 3{,}5 \cos 4\pi t$. ¿A qué son iguales la amplitud de las oscilaciones y su frecuencia angular? ¿A qué es igual la fase de las oscilaciones al cabo de cinco segundos después de iniciarse las oscilaciones?
6. ¿Qué amplitudes tienen y en qué períodos están las tres oscilaciones armónicas, cuyas gráficas vienen representadas en las figuras 9 y 10?

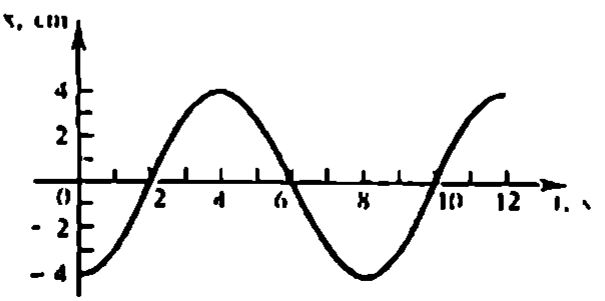


Fig. 10

1.7. Velocidad y aceleración en las oscilaciones armónicas

Cuando las oscilaciones son armónicas, las coordenadas del cuerpo oscilante, su velocidad y su aceleración también varían armonicamente. La proyección de la velocidad sobre el eje X es la derivada de la coordenada x respecto del tiempo. Si $x = x_m \cos \omega_0 t$, será

$$v_x = x' = -\omega_0 x_m \operatorname{sen} \omega_0 t = \omega_0 x_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (1.25)$$

La velocidad en las oscilaciones armónicas varía con el tiempo armónicamente, pero las oscilaciones de la velocidad adelantan en fase a las oscilaciones de la coordenada en $\pi/2$.

En el instante en que la coordenada es nula (instante del paso por la posición de equilibrio), el módulo de la velocidad es máximo y, viceversa, la velocidad es nula cuando el módulo de la coordenada es máximo (fig. 11, *a* y *b*). La amplitud v_m de las oscilaciones de la velocidad, es decir, el valor máximo del módulo de la velocidad se expresa mediante la amplitud de las oscilaciones del cuerpo así:

$$v_m = \omega_0 x_m$$

La proyección de la aceleración sobre el eje X es la derivada de la proyección de la velocidad (véase la fórmula 1.25) respecto del tiempo:

$$a_x = v_x' = -\omega_0^2 x_m \cos \omega_0 t,$$

o bien

$$a_x = \omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \pi) \qquad (1.26)$$

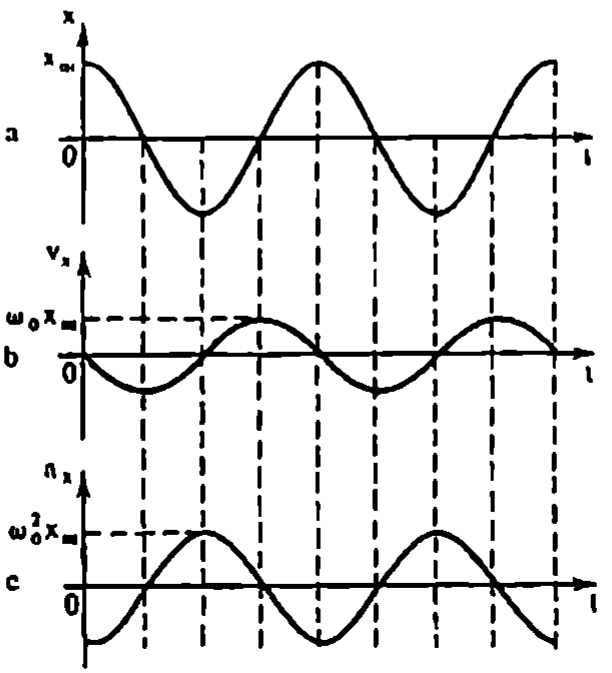


Fig. 11

La aceleración en las oscilaciones armónicas varía armónicamente. La amplitud de la aceleración es $a_m = \omega_0^2 x_m$ y las oscilaciones de la aceleración adelantan en fase a las oscilaciones de la coordenada en π

La aceleración y la coordenada llegan al mismo tiempo a tener el módulo máximo, pero con signos contrarios. En estos casos se dice que sus oscilaciones se cumplen en oposición de fase (fig. 11, *a* y *c*).

Respecto de las oscilaciones de la velocidad, las oscilaciones de la aceleración están desfasadas en $\pi/2$, y la amplitud de la aceleración está relacionada con la de la velocidad por la fórmula

$$a_m = v_m \omega_0$$

1.8. Transformaciones de la energía en el caso de las oscilaciones armónicas

TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS SIN ROZAMIENTO. Desplazando la bolita sujeta al muelle (véase la fig. 3) hacia la derecha hasta la distancia x_m, comunicamos al sistema oscilante cierta reserva de energía potencial

$$W_{pm} = \frac{kx_m^2}{2}$$

Al moverse la bolita hacia la izquierda, la deformación del muelle va reduciéndose y la energía potencial disminuye. Pero al mismo tiempo aumenta la velocidad y, por lo tanto, crece la energía cinética. En el instante en que la bolita pasa por la posición de equilibrio la energía potencial es mínima. La cinética alcanza el valor máximo.

Después de pasar la posición de equilibrio la velocidad empieza a decrecer. Por consiguiente, disminuye la energía cinética. La energía potencial, en cambio, vuelve a aumentar. En el punto extremo izquierdo esta energía llega a su máximo y la cinética se anula. De este modo, durante las oscilaciones la energía potencial se transforma en cinética y viceversa. Esto mismo se puede observar en las oscilaciones de un péndulo.

La energía mecánica total, en el caso de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, es igual a la suma de las energías cinética y potencial:

$$W = W_c + W_p = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \qquad (1.27)$$

Las energías cinética y potencial varían periódicamente. Pero la energía mecánica total de un sistema aislado, en el cual están ausentes las fuerzas de resistencia, permanece, según la ley de conservación de la energía, invariable. Esta energía es igual a la energía potencial, en el instante en que la elongación es máxima, o la energía cinética, en el instante en que el cuerpo pasa por la posición de equilibrio:

$$W = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}. \qquad (1.28)$$

Como

$$v_m = \omega_0 x_m = \sqrt{\frac{k}{m}}\, x_m,$$

se ve fácilmente que la ecuación (1.28) se cumple realmente.

Por lo tanto, la energía de un cuerpo oscilante es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones de la coordenada o al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones de la velocidad.

OSCILACIONES AMORTIGUADAS. Las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle o de un péndulo sólo son armónicas cuando no existe rozamiento. Pero las fuerzas de rozamiento, o más exactamente, de resistencia, aunque pueden ser pequeñas, siempre actúan sobre el cuerpo oscilante.

Las fuerzas de resistencia efectúan trabajo negativo y con ello hacen que disminuya la energía mecánica del sistema. Por eso, con el tiempo, las elongaciones máximas del cuerpo son cada vez menores. Por último, una vez que se agota la reserva de energía mecánica, las oscilaciones cesan por completo. En presencia de fuerzas de resistencia, las oscilaciones son *amortiguadas*.

La gráfica de la coordenada del cuerpo en función del tiempo, cuando las oscilaciones son amortiguadas, se da en la fig. 12. Una gráfica semejante se puede conseguir que la trace el mismo cuerpo que oscila, por ejemplo, un péndulo. En la fig. 13 se representa un péndulo provisto de un embudo con arena. El péndulo va dejando, sobre una hoja de cartón que se desliza uniformemente debajo de él, un reguero de arena que describe la gráfica de la dependencia de la coordenada (elongación) respecto del tiempo. Éste es un procedimiento sencillo de "desarrollar con el tiempo" las oscilaciones, que da una imagen bastante completa del proceso del movimiento oscilatorio. Si la resistencia no es grande, el amortiguamiento de las oscilaciones en el transcurso de varios períodos es pequeño. Pero si a los hilos de suspensión se sujeta una hoja de papel fuerte, para aumentar la fuerza de la resistencia, la amortiguación se hace considerable.

Cuando se conectan los aparatos de medida eléctrica (amperímetro o voltímetro) su aguja indicadora no de inmediato se detiene en la posición de equilibrio correspondiente a un valor determinado de la magnitud medida. Durante algún tiempo oscila. Para no perder demasiado tiempo en precisar las indicaciones, conviene aumentar el amortiguamiento de las oscilaciones de la aguja. Eso se consigue por medio de dispositivos especiales. En particular, si a la aguja se sujeta una plaquita metálica situada entre los polos de un imán, las

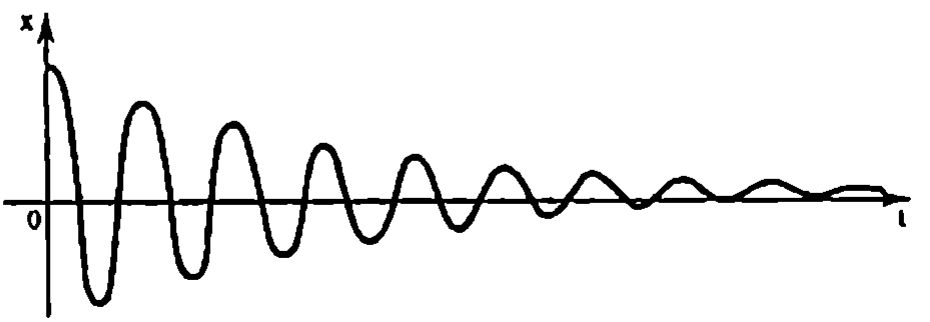


Fig. 12

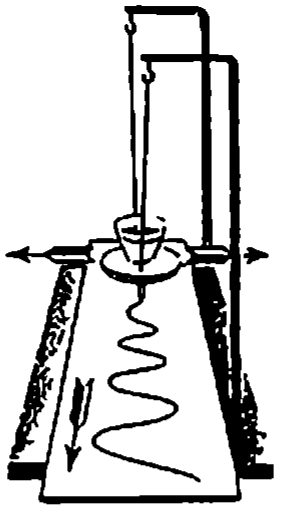


Fig. 13

oscilaciones se amortiguan pronto. Esto se debe a la interacción de las corrientes inducidas en la plaquita con el campo magnético del imán.

En los automóviles se emplean amortiguadores especiales para atenuar las oscilaciones de la carrocería sobre las ballestas durante la marcha por caminos accidentados. Cuando la carrocería oscila, un émbolo unido a ella se mueve dentro de un cilindro lleno de líquido. Este último pasa a través de un agujero que hay en el émbolo, con lo que se producen grandes fuerzas de resistencia y las oscilaciones se amortiguan rápidamente.

¿ ?

1. ¿Cuántas veces aumenta la amplitud de las oscilaciones de la velocidad y de la aceleración, si la frecuencia de las oscilaciones se duplica? La amplitud de las oscilaciones de la coordenada (elongación) permanece invariable.
2. ¿Cómo varían la velocidad y la aceleración en las oscilaciones armónicas durante el tiempo en que el módulo de la coordenada del cuerpo disminuye?
3. Dos péndulos constituidos por bolitas de radios iguales, pero masas distintas, suspendidas por hilos de la misma longitud, oscilan. ¿Qué oscilaciones se amortiguarán antes, las del más liviano o las del más pesado?

1.9. Oscilaciones forzadas. Resonancia

Las oscilaciones libres siempre se amortiguan al cabo de más o menos tiempo.

Por esta razón se utilizan poco en la práctica. Tienen mayor importancia las oscilaciones no amortiguadas (entretenidas) que pueden durar un tiempo ilimitado.

El procedimiento más sencillo de excitar oscilaciones no amortiguadas consiste en que sobre el sistema actúe una fuerza periódica exterior.

Las oscilaciones que se cumplen bajo la acción de una fuerza periódica exterior se llaman forzadas.

El trabajo que realiza dicha fuerza sobre el sistema asegura el aflujo de energía hacia aquél desde fuera. Este aflujo de energía impide que las oscilaciones se amortigüen a pesar de la acción de las fuerzas de rozamiento.

Bajo la influencia de una fuerza periodica cualquier cuerpo o sistema realizará oscilaciones. Oscilaciones de este tipo efectúan, por ejemplo, los tamices de distintas máquinas clasificadoras

Tienen especial interés las oscilaciones forzadas en un sistema capaz de efectuar oscilaciones libres. Este caso lo conoce todo aquel que haya tenido ocasión de mecer un niño en un columpio.

Un columpio es un péndulo, es decir, un sistema que posee determinada frecuencia propia. Desviar un columpio de su posición de equilibrio un gran ángulo ejerciendo sobre él una fuerza pequeña constante con el tiempo, es imposible. Una persona adulta tampoco conseguirá que el columpio se balancee si lo empuja desordenadamente en ambos sentidos. Pero si, con ritmo regular, empieza a empujarlo hacia adelante cada vez que pasa por su lado, sin hacer gran esfuerzo logrará que el balanceo llegue a ser muy grande. Verdad es que para eso se necesitará cierto tiempo Cada impulso por separado puede ser insignificante. Después del primero el columpio efectuará oscilaciones muy pequeñas. Pero si el ritmo de estas oscilaciones y el de los impulsos exteriores coinciden, el segundo empuje se producirá a tiempo y reforzará la acción del primero. El tercero ampliará aún más las oscilaciones y así sucesivamente. Las acciones de los impulsos por separado se van acumulando y, como resultado, la amplitud de las oscilaciones del columpio se hace grande No obstante, si los impulsos por separado se suceden a destiempo, la acción de uno será contrarrestada por la del siguiente y el efecto no se notará.

Esta posibilidad de aumentar considerablemente la amplitud de las oscilaciones de cualquier sistema capaz de efectuar oscilaciones libres, si la frecuencia de la fuerza exterior periódica coincide con la frecuencia propia del sistema oscilante, ofrece especial interés

OSCILACIONES FORZADAS DE UNA BOLITA SUJETA A UN MUELLE Consideremos las oscilaciones forzadas en un sistema que posea frecuencia propia de oscilación. En vez de un péndulo conviene más tomar una bolita sujeta a dos muelles Supongamos que el extremo de uno de ellos está sujeto a su vez a un hilo apoyado en una pólea (fig. 14) El otro extremo de este hilo se sujeta por medio de un pasador a un disco. Si el disco se hace girar con un motor eléctrico, sobre la bolita empieza a actuar una fuerza periódica exterior.

La bolita comienza a balancearse La amplitud de las oscilaciones va aumentando. Al cabo de cierto tiempo las oscilaciones adquieren carácter estable, su amplitud deja de variar con el tiempo. Prestando atención se observa que la frecuencia de las oscilaciones de la bolita es exactamente igual a la frecuencia de las oscilaciones del extremo del muelle, es decir, a la frecuencia con que varia la fuerza exterior. (Esta frecuencia es igual al número de revoluciones del disco por minuto.)

RESONANCIA. En las oscilaciones forzadas estables la frecuencia de oscilación es igual a la frecuencia de la fuerza exterior.

Utilizando el dispositivo representado en la fig. 14, vamos a aclarar cómo la amplitud de las oscilaciones forzadas estables depende de la frecuencia.

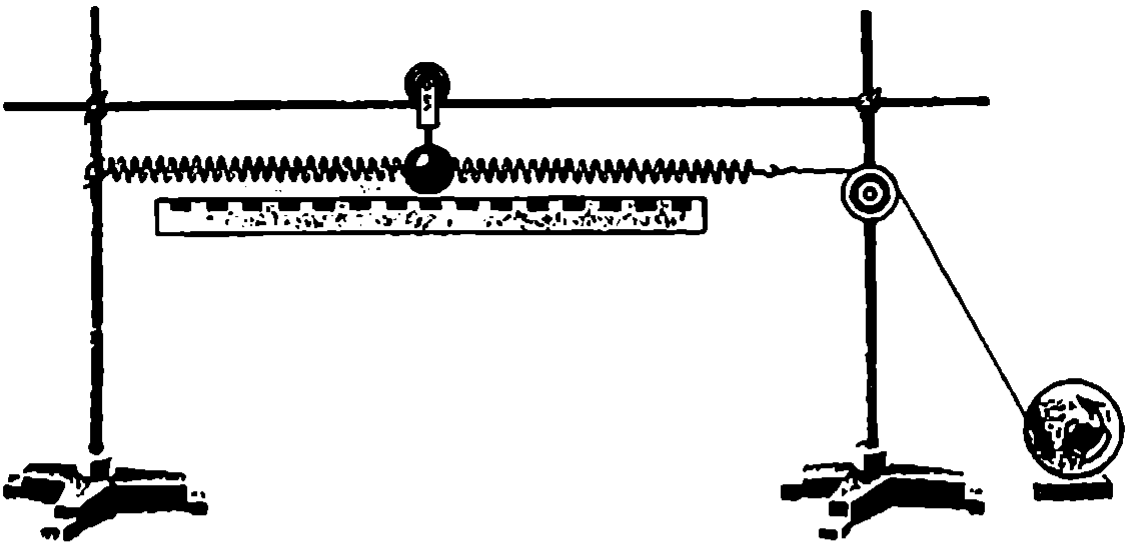


Fig. 14

Incrementando suavemente la frecuencia de la fuerza exterior, notamos que la amplitud de las oscilaciones crece. Esta amplitud llega al máximo cuando la fuerza exterior actúa al compás de las oscilaciones libres de la bolita. Exactamente del mismo modo la amplitud de las oscilaciones de un columpio alcanza el máximo cuando se le empuja con una frecuencia igual a la de sus oscilaciones libres.

Si la frecuencia sigue aumentando, la amplitud de las oscilaciones estables vuelve a ser menor. La dependencia de la amplitud de las oscilaciones respecto de la frecuencia se representa en la fig. 15. Cuando las frecuencias de la fuerza exterior son muy grandes, la amplitud tiende a cero, ya que el cuerpo, a causa de su inercia, como no tiene tiempo de desplazarse apreciablemente durante los pequeños intervalos de éste, "tiembla en su sitio".

El crecimiento brusco de la amplitud de las oscilaciones forzadas, al

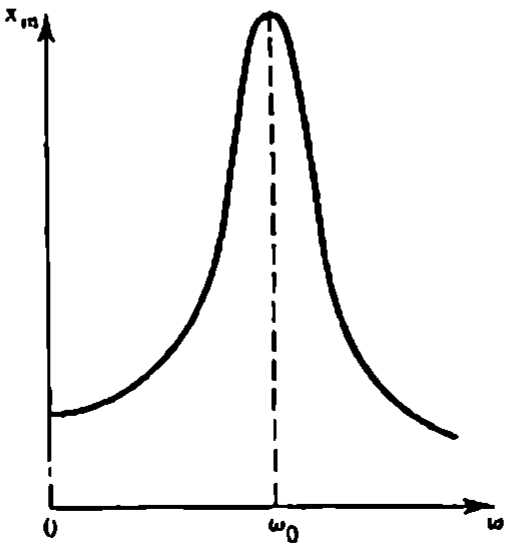


Fig. 15

coincidir la frecuencia con que varía la fuerza exterior que actúa sobre el sistema y la frecuencia de las oscilaciones libres, se llama resonancia[1]

¿Por qué se produce la resonancia? Este fenómeno puede explicarse partiendo de razonamientos energéticos.

En resonancia es máxima la amplitud de las oscilaciones forzadas porque se crean las condiciones más favorables para la transmisión de energía de la fuente exterior de fuerza periódica al sistema. La fuerza exterior en resonancia actúa al compás de las oscilaciones libres. Durante todo el período su sentido coincide con el de la velocidad del cuerpo oscilante. Por eso, durante todo el período, dicha fuerza realiza únicamente trabajo positivo. Cuando las oscilaciones son estables, el trabajo positivo de la fuerza exterior es igual, en módulo, al trabajo negativo de la fuerza de resistencia, siendo ésta proporcional a la velocidad del movimiento del cuerpo.

Si la frecuencia de la fuerza exterior no es igual a la frecuencia propia ω_0 de las oscilaciones del sistema, la fuerza exterior sólo realiza trabajo positivo durante una parte del período. Durante el resto del período la fuerza está dirigida en sentido opuesto a la velocidad y su trabajo es negativo. En total el trabajo de la fuerza exterior durante el período es pequeño y, respectivamente, también es pequeña la amplitud de las oscilaciones estables.

AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES EN RESONANCIA. Una influencia importante sobre la resonancia ejerce el rozamiento en el sistema. Durante la resonancia el trabajo positivo de la fuerza exterior se emplea totalmente en cubrir los gastos de energía debidos al trabajo negativo de la fuerza de resistencia.

Cuando las velocidades del movimiento son pequeñas, el módulo de la fuerza de rozamiento es directamente proporcional al módulo de la velocidad del movimiento. Por lo tanto, se puede escribir:

$$F_{roz} = -\mu v,$$

donde μ es el coeficiente de rozamiento y el signo "menos" indica que el sentido de la fuerza de rozamiento es contrario al de la velocidad.

Pero el módulo del trabajo de la fuerza de rozamiento será igual al módulo del trabajo de la fuerza exterior en el mismo camino recorrido, si la amplitud de la fuerza de rozamiento, igual a μv_m, y la amplitud F_m de la fuerza exterior son iguales, es decir, cuando se cumple la condición

$$\mu v_m = \mu\omega_0 x_m = F_m.$$

De aquí, la amplitud de las oscilaciones forzadas en resonancia se determina así:

$$x_m = \frac{F_m}{\mu\omega_0}.$$

---

[1] En la realidad, debido a la influencia del rozamiento, la resonancia se produce cuando la frecuencia de la fuerza exterior es aún algo menor que la frecuencia propia del sistema oscilante.

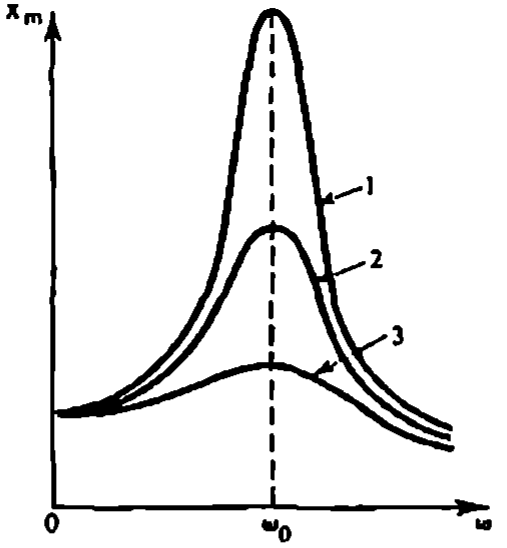


Fig. 16

Cuanto menor sea el coeficiente de rozamiento, tanto mayor será la amplitud de las oscilaciones estables.

La variación de la amplitud de las oscilaciones en función de la frecuencia para distintos coeficientes de rozamiento y una misma amplitud de la fuerza exterior se representa en la fig. 16. La curva *1* corresponde al rozamiento mínimo, y la *3*, al máximo. En esta figura se ve bien que el aumento de la amplitud de las oscilaciones forzadas en resonancia se manifiesta tanto más claramente, cuanto menor es el rozamiento en el sistema.

Cuando el rozamiento es pequeño, la resonancia es "aguda", y cuando es grande, "obtusa". Si la frecuencia de las oscilaciones está lejos de la correspondiente a la resonancia, la amplitud de las oscilaciones es pequeña y casi no depende de la fuerza de resistencia en el sistema.

En un sistema con pequeño rozamiento la amplitud de las oscilaciones en resonancia puede ser muy grande, incluso en el caso en que la fuerza exterior sea pequeña. Pero la gran amplitud sólo se establecerá al cabo de bastante tiempo de haber comenzado a actuar la fuerza exterior. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, una fuerza exterior pequeña sólo puede comunicar al sistema una gran amplitud de oscilación y, por lo tanto, una gran energía, en un intervalo de tiempo grande. Si el rozamiento es grande, la amplitud de las oscilaciones será pequeña y para que las oscilaciones se estabilicen no será necesario mucho tiempo.

De la resonancia tiene sentido hablar si la amortiguación de las oscilaciones libres del sistema es pequeña. De lo contrario la amplitud de las oscilaciones forzadas $\omega = \omega_0$ difiere poco de la de las oscilaciones con otras frecuencias

1.10. Aplicaciones de la resonancia y lucha contra ella

Si un sistema oscilante cualquiera se encuentra bajo la acción de una fuerza periódica exterior, puede comenzar la resonancia y el aumento brusco de la amplitud de las oscilaciones que con ella se produce.

Todo cuerpo elástico, sea un puente, la bancada de una máquina, un árbol o el casco de un buque, es un sistema oscilante y se caracteriza por tener frecuencias propias de oscilación. Durante el funcionamiento de los motores a menudo surgen esfuerzos periódicos debidos al movimiento de las partes del motor (por ejemplo, de los émbolos) o a que el centrado de las piezas giratorias (como los árboles) no es exacto. Si la frecuencia de los esfuerzos periódicos coincide con la frecuencia de las oscilaciones propias, se produce la resonancia. Las oscilaciones pueden crecer tanto, que ocasionen la rotura de la máquina, aunque la tensión en el material no supere el límite de rotura para las cargas estáticas. Esto se explica porque el hierro, el acero y otros materiales, cuando las cargas son variables, pierden su resistencia mecánica más o menos pronto y se rompen de repente.

En todos estos casos se toman medidas especiales para impedir que se produzca la resonancia o para debilitar su acción. Para esto se aumenta el rozamiento en el sistema o se procura que las frecuencias propias de sus oscilaciones no coincidan con la frecuencia de la fuerza exterior. Se conocen casos en los cuales ha habido que reconstruir trasatlánticos para disminuir su vibración.

Al pasar los puentes se prohibe a las unidades militares llevar el paso. El ritmo de la marcha de los soldados provoca una acción periódica sobre el puente. Si por casualidad la frecuencia de esta acción coincide con la frecuencia propia de las oscilaciones del puente, éste puede romperse.

Hemos puesto unos ejemplos de consecuencias perniciosas de la resonancia. Pero también las hay útiles, como, por ejemplo, en el caso del columpio.

En el fenómeno de la resonancia se basa el *frecuencímetro*, aparato que sirve para medir la frecuencia de la corriente alterna. Este aparato consta de un juego de plaquitas elásticas con pequeñas masas pendulares en sus extremos. Las plaquitas están sujetas en voladizo sobre un listón común (fig. 17). Cada plaquita posee una determinada frecuencia propia de oscilación, que depende de sus propiedades elásticas, de su longitud y masa.

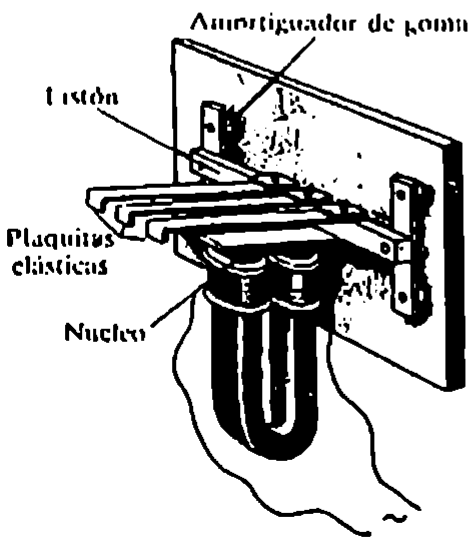


Fig. 17

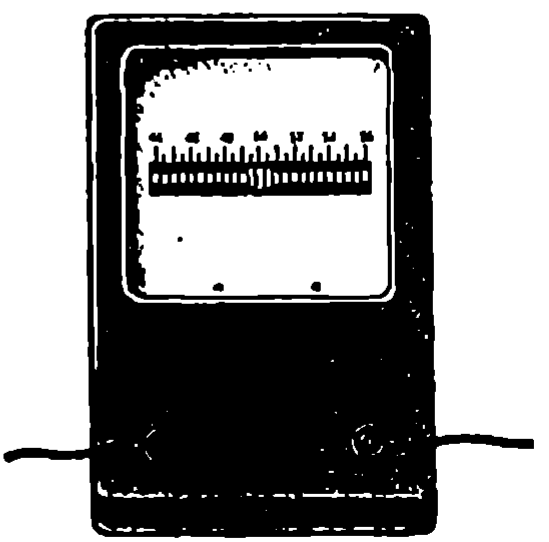


Fig. 18

Las frecuencias propias de oscilación de las plaquitas son conocidas Bajo la acción de un electroimán, el listón, y con él todas las plaquitas, efectúan oscilaciones forzadas. Pero únicamente las de aquellas plaquitas cuya frecuencia propia de oscilación coincide con la frecuencia de las oscilaciones del listón tendrán gran amplitud (fig. 18). Esto permite determinar la frecuencia de la corriente alterna.

Otras muchas aplicaciones de la resonancia, cuya importancia es mucho mayor, se darán a conocer más adelante

1.11. Autooscilaciones

Las oscilaciones forzadas no amortiguadas se mantienen en el sistema por la acción de la fuerza periódica exterior. Pero este procedimiento no es el único posible para obtener oscilaciones entretenidas.

Supongamos que dentro de un sistema capaz de efectuar oscilaciones libres existe una fuente de energía. Si el propio sistema oscilante regula el suministro de energía al cuerpo que oscila, para compensar las pérdidas por rozamiento, en él pueden producirse oscilaciones no amortiguadas.

Un sistema simple de este tipo es el reloj de péndulo ordinario. Este sistema posee una reserva de energía determinada: la energía potencial de las pesas subidas o del muelle tenso Las pesas hacen que gire la rueda de escape (o de Santa Catalina), de dientes oblicuos (fig. 19). Al péndulo va sujeta rígidamente una pieza arqueada *ab*, llamada áncora, con dos salientes o uñas en los extremos Por medio del áncora el péndulo regula la rotación de la rueda de escape y de las agujas del reloj, que están ligadas con ella. Con esto la energía de las pesas va transmitiéndose en porciones al péndulo.

En la posición representada en la figura, el diente de la rueda de escape presiona sobre el bisel de la uña *b* del áncora, la sube y empuja el péndulo hacia la izquierda. Una vez pasada la posición de equilibrio, la uña *b* se desliza del diente, pero casi inmediatamente el áncora, con su uña *a*, se apoya en otro

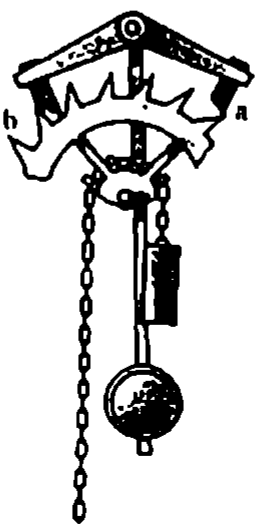


Fig. 19

diente de la rueda de escape y el péndulo recibe el impulso hacia el otro lado Como resultado, dos veces por período el péndulo recibe energía, abriendo y cerrando él mismo el paso a la energía de la fuente.

Las oscilaciones no amortiguadas del péndulo se efectúan con una frecuencia casi igual a la de sus oscilaciones libres, si el rozamiento es pequeño Por eso precisamente los relojes tienen una marcha regular. El primero en utilizar el péndulo para conseguir la marcha regular de un reloj fue Ch. Huygens, en 1657. En los relojes con muelle motor, en vez del péndulo se utiliza generalmente el volante (ruedecilla con muelle capilar en espiral), que realiza oscilaciones torsionales alrededor de su eje.

Los sistemas, como el reloj, en los cuales se generan oscilaciones no amortiguadas, a expensas del suministro de energía de una fuente, se llaman *sistemas autooscilantes.* A estos sistemas pertenecen el timbre eléctrico con interruptor, el tubo de órgano, el silbato y muchos otros Nuestro corazón y pulmones también pueden considerarse como sistemas autooscilantes.

Las oscilaciones no amortiguadas, que pueden existir en un sistema sin que sobre él actúen fuerzas periódicas exteriores, se llaman autooscilaciones

Mientras que la frecuencia de las oscilaciones forzadas coincide con la frecuencia de la fuerza exterior y la amplitud de las oscilaciones depende de la amplitud de esta fuerza, la frecuencia y la amplitud de las autooscilaciones quedan definidas por las propiedades del propio sistema. Las autooscilaciones difieren también de las oscilaciones libres en que, PRIMERO, no se amortiguan con el tiempo, y, SEGUNDO, su amplitud no depende de la magnitud de la acción inicial de corta duración ("impulso") que excita las oscilaciones.

* * *

Terminamos el estudio de las oscilaciones (vibraciones) mecánicas. Debe prestarse atención a un rasgo común de todas las oscilaciones, que las distingue de otras formas de movimiento mecánico.

Por regla general, cuando se estudia el movimiento mecánico de un cuerpo (como, por ejemplo, el movimiento de una nave espacial o de un planeta bajo la influencia de la atracción universal) el problema consiste en hallar la posición del cuerpo y su velocidad en cualquier instante. Pero cuando se estudian los procesos oscilatorios periódicos, lo que más interesa son los rasgos generales, que caracterizan la repetición del movimiento, y no la posición y la velocidad del cuerpo oscilante en un instante cualquiera. Importa conocer la amplitud y el período de las oscilaciones, o sea, las magnitudes que caracterizan el proceso en conjunto. Cuando las oscilaciones son forzadas hay que conocer la relación entre las frecuencias de la fuerza impulsora y de las oscilaciones libres Ella precisamente define el carácter del proceso, su intensidad.

¿ ?

1. ¿Ha tenido ocasión de observar el fenómeno de la resonancia en su casa o en la calle?
2. Para mantener abierta una puerta del vestíbulo del metro de Moscú (dicha puerta se abre en los dos sentidos y retorna a la posición de equilibrio por la acción de muelles) hay que aplicar al asidero de la misma una fuerza de aproximadamente 50 N. ¿Se podrá abrir dicha puerta aplicando al mismo asidero una fuerza de 0,005 N? El rozamiento en los goznes de la puerta se menosprecia

3. ¿Qué condición es necesaria para que las propiedades de resonancia de un sistema oscilante se manifiesten con claridad?
4. Ponga ejemplos de sistemas autooscilantes que no fueron mencionados en el texto.
5. ¿En qué difieren las autooscilaciones de las oscilaciones forzadas y de las libres?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. ¿Cuántas oscilaciones n realiza un péndulo simple de longitud $l = 4{,}9$ m en el tiempo $t = 5$ min?

Solución. El periodo de las oscilaciones se determina por la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

El número de oscilaciones que se busca se halla así.

$$n = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}},$$

$$n \approx 68.$$

PROBLEMA 2. Un muelle suspendido verticalmente, tensado por un cuerpo sujeto a él, se estira una longitud $x = 0{,}8$ cm. ¿A qué es igual el periodo T de las oscilaciones libres del cuerpo? La masa del muelle se desprecia.

Solución. El periodo de las oscilaciones del cuerpo sujeto al muelle se halla por la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

en la que m es la masa del cuerpo y k, la rigidez del muelle. Sobre el cuerpo actúan la fuerza de la gravedad G y la fuerza de elasticidad F. Cuando el cuerpo se halla en reposo estas fuerzas se compensan entre sí, es decir, sus módulos son iguales:

$$G = F.$$

Y como $G = mg$ y $F = kx$ (ley de Hooke), resulta que

$$mg = kx,$$

de donde

$$\frac{m}{k} = \frac{x}{g}$$

Por consiguiente,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g}},$$

$$T \approx 0{,}2 \text{ s}$$

PROBLEMA 3. Por una varilla horizontal puede deslizarse un cuerpo cuya masa $m = 4$ kg. Este cuerpo está sujeto a un muelle (véase la fig. 3) cuya rigidez es de 225 N/m. El otro extremo del muelle está fijo. En cierto instante inicial se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio hasta una distancia $x_m = 10$ cm y se suelta. Determinar la coordenada (elongación) del cuerpo, la proyección de su velocidad y su aceleración al cabo de 1/8 de período de oscilación después de dicho instante inicial. El rozamiento no se toma en consideración.

Solución. La dependencia de la coordenada (elongación) del cuerpo respecto del tiempo se expresa así:

$$x = x_m \cos \omega_0 t$$

Como $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ y $t = \frac{T}{8}$, resulta que

$$x = x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{8}\right) = x_m \cos \frac{\pi}{4},$$

$$x \approx 0{,}071 \text{ m}$$

Para la proyección de la velocidad del cuerpo se obtiene

$$v_x = \omega_0 x_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = -\sqrt{\frac{k}{m}}\, x_m \operatorname{sen} \frac{\pi}{4},$$

$$v_x \approx -0{,}53 \text{ m/s}.$$

La proyección de la aceleración se puede hallar como sigue

$$a_x = -\omega_0^2 x = -\frac{k}{m} x,$$

$$a_x \approx -4 \text{ m/s}^2.$$

PROBLEMA 4. Hallar el período de las oscilaciones de una botella que flota en la superficie del agua en posición vertical, si su masa $m = 200$ g el área de su sección transversal $S = 50$ cm^2.

Solución. Cuando la botella flota libremente, las fuerzas de la gravedad y de Arquímedes que actúan sobre ella se equilibran mutuamente, o sea, su resultante es nula. Pero si la botella se desplaza de su posición de equilibrio (hacia arriba o hacia abajo) una distancia x, la fuerza resultante no será nula.

Su proyección sobre el eje vertical se expresa por la fórmula

$$F_x = -\rho g S x,$$

en la que ρ es la densidad del agua. El signo "menos" indica que el sentido de la fuerza resultante es contrario al desplazamiento de la botella. De acuerdo con la segunda ley de Newton

$$a_x = \frac{F_x}{m}.$$

Por consiguiente,

$$a_x = -\frac{\rho g S}{m} x.$$

Esta ecuación define las oscilaciones armónicas, que se realizan con la frecuencia angular

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho g S}{m}}.$$

El período T de las oscilaciones armónicas de la botella se halla así.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g S}},$$

$$T \approx 0{,}4 \text{ s}$$

PROBLEMA 5. Un cuerpo, sujeto a un muelle, oscila deslizándose por una varilla horizontal lisa (véase la fig. 3). Hallar la razón de la energía cinética del cuerpo a la energía potencial del sistema en el instante en que dicho cuerpo se encuentra en un punto situado a la mitad de la distancia entre su posición extrema y la de equilibrio.

Solución. La coordenada del punto indicado es igual a la mitad de la amplitud de las oscilaciones: $x = x_m/2$. La energía potencial del sistema en el instante en que el cuerpo pasa por este punto es

$$W_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_m^2}{8}.$$

Pero en todo instante, según la ley de conservación de la energía, se cumple la igualdad

$$W_c + W_p = \frac{kx_m^2}{2}.$$

De donde la energía cinética del cuerpo en el instante en que pasa por el punto dado se determina así:

$$W_c = \frac{kx_m^2}{2} - W_p = \frac{kx_m^2}{2} - \frac{kx_m^2}{8} = \frac{3}{8} kx_m^2.$$

Por consiguiente,

$$\frac{W_c}{W_p} = 3$$

Ejercicio 1

1. Un cuerpo de masa $m = 100$ g oscila con la frecuencia $\nu = 2$ Hz bajo la acción de un muelle. Hallar la rigidez k del muelle.
2. La longitud del péndulo de Foucault en la catedral de San Isaac de Leningrado es de 98 m. ¿A qué es igual el período de las oscilaciones de este péndulo?

3 Un péndulo efectúa $n_1 = 10$ oscilaciones. Otro péndulo, en el mismo tiempo que el primero, realiza $n_2 = 6$ oscilaciones. La diferencia entre las longitudes de ambos péndulos es $\Delta l = 16$ cm. Hallar las longitudes l_1 y l_2 de dichos péndulos

4 ¿Cómo variaría el período de las oscilaciones de un péndulo si se trasladara de la Tierra a la Luna? La masa de la Luna es 81 veces menor que la de la Tierra y el radio de esta última es 3,7 veces mayor que el de la Luna

5. Una bolita suspendida por un hilo se desvía de su posición de equilibrio un ángulo pequeño y se suelta. Otra bolita cae libremente, sin velocidad inicial, desde el punto de suspensión del hilo. ¿Cuál de las dos bolitas llegará antes a la posición de equilibrio de la primera, si empezaron a moverse al mismo tiempo?

6 Una bolita sujeta a un muelle se desplaza hasta la distancia de 1 cm de su posición de equilibrio y se suelta. ¿Qué camino recorrerá la bolita en 2 s, si la frecuencia de sus oscilaciones $\nu = 5$ Hz? La amortiguación de las oscilaciones se puede despreciar.

7 La coordenada de un cuerpo que efectúa oscilaciones armónicas a lo largo del eje X varía de acuerdo con la ley $x = 5\cos 2\pi t$. La coordenada se mide en centímetros y el tiempo en segundos. Determinar la amplitud de las oscilaciones de la velocidad y la proyección de ésta sobre el eje en el instante en que la fase de las oscilaciones de la coordenada es igual a $(5/6)\pi$

8 Un cuerpo de masa igual a 200 g oscila en el plano horizontal, con una amplitud de 2 cm, bajo la acción de un muelle cuya rigidez es de 16 N/m. Determinar la frecuencia angular de las oscilaciones de este cuerpo, la energía del sistema y la amplitud de las oscilaciones de la velocidad

9. Por el fondo, en forma de casquete esférico, de un platillo oscila, deslizándose sin rozamiento, un cubo pequeño (fig. 20). ¿Cuál será el período de sus oscilaciones, si el radio de curvatura del fondo del platillo es R?

10 Un automóvil marcha por un camino accidentado en el cual la distancia entre montículos es igual, aproximadamente, a 8 m. El período de las oscilaciones libres del automóvil sobre sus ballestas es de 1,5 s. ¿A qué velocidad del automóvil sus oscilaciones en el plano vertical se notarán más?

11. Bajo la acción de una fuerza constante F, una bolita sujeta al extremo de un muelle, cuya rigidez es de 16 N/m, se desplaza 1 cm. ¿Cuál sería la amplitud de las oscilaciones forzadas de dicha bolita en resonancia, si sobre ella actuara una fuerza exterior periódica F de amplitud F_m, siendo la masa de la bolita igual a 0,36 kg? El coeficiente de rozamiento del sistema $\mu = 0,24$ kg/s

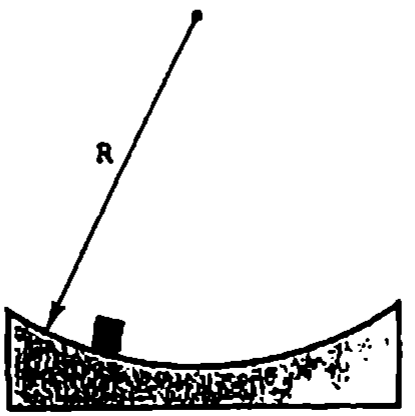


Fig. 20

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 1

Las oscilaciones (vibraciones) de distinta naturaleza (mecánicas, eléctricas, etc.) se definen por leyes cuantitativas iguales. Existen oscilaciones libres, forzadas y autooscilaciones.

Las oscilaciones libres se generan en el sistema bajo la influencia de las fuerzas interiores, una vez que éste ha sido sacado de su posición de equilibrio. Pueden efectuar oscilaciones mecánicas libres, por ejemplo, un cuerpo sujeto a un muelle y un péndulo. Con el tiempo las oscilaciones libres se amortiguan a causa del rozamiento.

Las oscilaciones forzadas se producen cuando sobre el sistema actúa una fuerza periódica exterior. Estas oscilaciones no se amortiguan mientras actúa la fuerza exterior. Un ejemplo de oscilaciones forzadas es el balanceo de un columpio empujado periódicamente.

Las oscilaciones no amortiguadas (o entretenidas) que pueden existir en un sistema sobre el cual no actúan fuerzas exteriores, se llaman autooscilaciones. Las oscilaciones en el sistema autooscilante se entretienen en este caso a expensas de la energía que proporciona una fuente que se encuentra dentro de él. Un ejemplo de sistema autooscilante es el reloj.

Las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle se definen por la segunda ley de Newton; con arreglo a este caso dicha ley toma la forma

$$x'' = -\omega_0^2 x,$$

donde x es la elongación del cuerpo; x'', su aceleración, ω_0^2, una constante dependiente de las propiedades del sistema. Una ecuación exactamente igual define las oscilaciones del péndulo simple.

La solución de la ecuación que define las oscilaciones libres se expresa por medio del coseno o del seno.

$$x = x_m \cos \omega_0 t \quad \text{o} \quad x = x_m \operatorname{sen} \omega_0 t$$

Las oscilaciones que se cumplen según la ley del coseno o del seno se llaman armónicas.

La elongación máxima x_m se denomina amplitud de las oscilaciones. La magnitud ω_0 recibe el nombre de frecuencia angular (o cíclica) de las oscilaciones y se expresa mediante el número de oscilaciones por segundo ν así:

$$\omega_0 = 2\pi\nu$$

El intervalo de tiempo mínimo al cabo del cual el movimiento del cuerpo se repite totalmente se llama período de las oscilaciones. El período puede expresarse por medio de la frecuencia angular del modo siguiente

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

A la magnitud que va detrás del signo de coseno o de seno se le da el nombre de fase de las oscilaciones. La fase determina el estado del cuerpo oscilante en un instante cualquiera para una amplitud dada de las oscilaciones.

La frecuencia angular propia (o natural) de las oscilaciones de un cuerpo

sujeto a un muelle depende de su masa m y de la rigidez del muelle k:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

La frecuencia propia de las oscilaciones de un péndulo simple se determina por la fórmula

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

en la que g es la aceleración de caída libre; l, la longitud del péndulo. La frecuencia (y el período) de las oscilaciones no depende de sus amplitudes.

La energía del cuerpo oscilante, en ausencia de fuerzas de rozamiento, permanece invariable:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}$$

Las oscilaciones forzadas ofrecen especial interés en el caso en que una fuerza periódica actúa sobre un sistema en el cual pueden producirse oscilaciones libres. En este caso se observa la resonancia, es decir, el brusco crecimiento de la amplitud de las oscilaciones forzadas cuando coinciden la frecuencia con que varía la fuerza exterior y la frecuencia propia del sistema oscilante. La resonancia sólo se manifiesta claramente en los sistemas con poco rozamiento.

2 OSCILACIONES ELÉCTRICAS

2.1. Oscilaciones eléctricas libres y forzadas

Las oscilaciones eléctricas fueron descubiertas, en cierto modo, casualmente Después de inventar la botella de Leyden (primer condensador) y de haber aprendido a comunicarle gran carga por medio de una máquina electrostática, se comenzó a estudiar la descarga eléctrica de la botella. Cerrando el circuito de las armaduras de la botella de Leyden mediante una bobina de alambre, se descubrió que los rayos de acero adentro de la bobina se imanaban. Esto no era extraño: la corriente eléctrica precisamente tiene que imanar el núcleo de acero de la bobina. Lo sorprendente era que no se podía predecir qué extremo del núcleo de la bobina resultaría ser el polo positivo y cuál el negativo Repitiendo el experimento en las mismas condiciones, aproximadamente, se obtenía en unos casos un resultado y en otros, el contrario No fue fácil comprender que al descargarse el condensador a través de la bobina se producen oscilaciones. Durante la descarga el condensador tiene tiempo de recargarse muchas veces y la corriente cambia de sentido también muchas veces A esto se debe el hecho de que el núcleo pueda imanarse de distintas formas.

Las oscilaciones periódicas o casi periódicas de la carga, de la intensidad de la corriente y de la tensión se llaman oscilaciones eléctricas.

Las oscilaciones eléctricas se consiguen casi con la misma facilidad con la que se hace que un cuerpo oscile colgándolo de un muelle Pero observar las oscilaciones eléctricas no es tan fácil, porque no podemos ver directamente cómo se recarga el condensador ni la corriente que pasa por la bobina Además, estas oscilaciones se efectúan de ordinario con una frecuencia muy grande.

Para observar y estudiar las oscilaciones eléctricas el aparato más apropiado es el osciló grafo electrónico.

En el tubo catódico del osciló grafo un estrecho haz de electrones incide sobre una pantalla capaz de emitir luz al ser bombardeada por los electrones

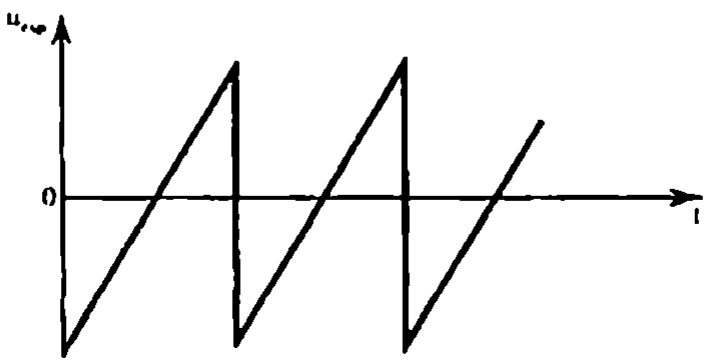


Fig. 21

Fig. 22

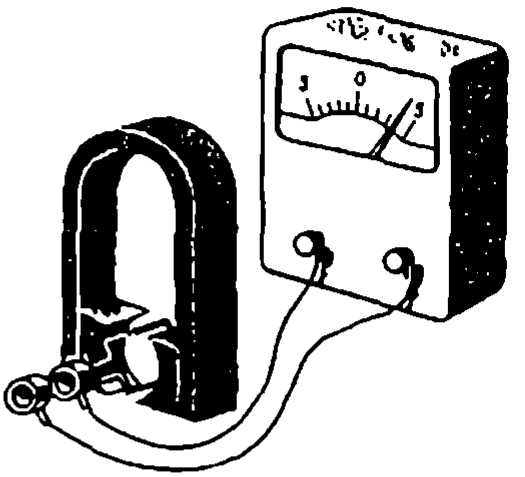


Fig. 23

A las placas de desviación horizontales se hace llegar una corriente alterna de exploración u_{exp} "en diente de sierra" (fig. 21) La tensión aumenta con relativa lentidad y después disminuye bruscamente El campo eléctrico entre las placas hace que el rayo electrónico recorra la pantalla en sentido horizontal a velocidad constante y que luego, casi instantáneamente, vuelva atrás. Después todo este proceso se repite Si ahora se conectan las placas de desviación verticales a un condensador, las oscilaciones de la tensión durante su descarga provocarán oscilaciones del rayo en sentido vertical. Como resultado se origina en la pantalla un "desarrollo" (barrido) de las oscilaciones con el tiempo (fig. 22) muy semejante al que trazaba el péndulo provisto del embudo con arena sobre la hoja de papel en movimiento Las oscilaciones se amortiguan con el tiempo[1]

Estas oscilaciones son *libres*. Se producen una vez que al condensador se le comunica la carga que saca al sistema de su posición de equilibrio La carga del condensador es equivalente a la desviacion del péndulo de su posición de equilibrio

No resulta difícil obtener en un circuito oscilaciones forzadas Estas oscilaciones se generan cuando en el sistema hay una fuerza electromotriz periódica. Una f.e m. alterna se produce en un cuadro de alambre de varias espiras, haciéndolo girar en un campo magnético homogéneo (fig. 23). En este

[1] Por lo general, las oscilaciones en el circuito se amortiguan en pequeñas fracciones de segundo. Por eso, para observarlas conviene utilizar un oscilógrafo con pantalla especial, capaz de emitir luz durante bastante tiempo después de haber sido excitada por el rayo electrónico

caso el flujo magnético que pasa a través del cuadro varía periódicamente. De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, también varía periódicamente la f. e. m. inducida. El origen de la f. e. m. inducida, en este caso, es el siguiente: sobre los electrones que se mueven junto con los conductores del cuadro actúa una fuerza por parte del campo magnético. Esta fuerza hace que los electrones se desplacen a lo largo de dichos conductores. Cuando el circuito se cierra, a través del galvanómetro pasa corriente alterna y la aguja indicadora empieza a oscilar en torno a la posición de equilibrio.

2.2. Circuito oscilante

El sistema más simple en que se pueden producir oscilaciones eléctricas libres consiste en un condensador y una bobina, conectada a las armaduras del condensador (fig. 24). Este sistema recibe el nombre de *circuito oscilante*.

Veamos por qué se originan las oscilaciones en el circuito. Carguemos el condensador, conectándolo durante cierto tiempo a una batería a través del conmutador K (fig. 25, *a*). El condensador recibe la energía

$$W_p = \frac{q_m^2}{2C}, \qquad (21)$$

donde q_m es la carga del condensador; C, su capacidad eléctrica. Entre las armaduras del condensador aparece la diferencia de potencial U_m.

Pasemos ahora el conmutador a la posición *2* (fig. 25, *b*). El condensador comienza a descargarse y por el circuito pasa corriente eléctrica. La intensidad de esta corriente no alcanza de inmediato su valor máximo, sino que va aumentando paulatinamente. Esto se debe al fenómeno de la autoinducción. Al aparecer la corriente se produce un campo magnético variable. Este campo magnético variable origina un campo eléctrico rotacional en el conductor. (De esto se habló en "Física 3".) El campo eléctrico rotacional, al aumentar el campo magnético, resulta dirigido en sentido contrario al de la corriente e impide que su crecimiento sea instantáneo.

A medida que se descarga el condensador la energía del campo eléctrico disminuye, pero al mismo tiempo aumenta la energía del campo magnético de

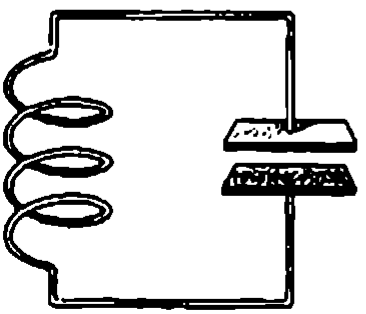


Fig. 24

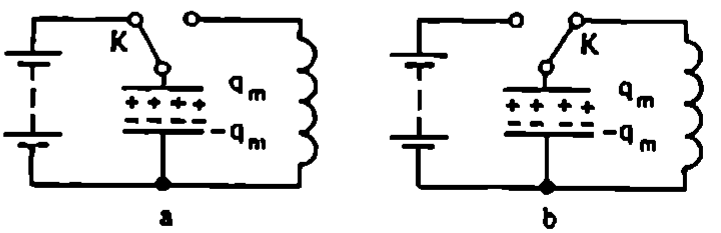


Fig. 25

la corriente, la cual se determina por la fórmula

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \qquad (2.2)$$

en la que i es la intensidad de la corriente; L, la inductancia de la bobina. En el instante en que el condensador se descarga totalmente ($q = 0$), la energía del campo eléctrico se anula. En cambio, la energía de la corriente (energía del campo magnético), de acuerdo con la ley de conservación de la energía, será máxima. Por consiguiente, en dicho instante la intensidad de la corriente también alcanza su valor máximo I_m.

A pesar de que en este instante la diferencia de potencial entre los extremos de la bobina es nula, la corriente eléctrica no se interrumpe en el acto, porque a esto se opone el fenómeno de la autoinducción. En cuanto la intensidad de la corriente y el campo magnético creado por ella empiezan a disminuir, aparece un campo eléctrico rotacional dirigido en el sentido de la corriente, el cual mantiene a ésta.

Como resultado, el condensador se recarga hasta que la corriente, decreciendo paulatinamente, se anule. La energía del campo magnético en este instante también será nula, pero la energía del campo eléctrico del condensador será máxima otra vez.

Luego el condensador volverá a recargarse y el sistema retornará al estado inicial. Si no hubiera pérdidas de energía este proceso proseguiría indefinidamente. Las oscilaciones serían no amortiguadas. Al cabo de intervalos de tiempo iguales al período de las oscilaciones, el estado del sistema se repetiría exactamente.

Pero en realidad las pérdidas de energía son inevitables. Así, en particular, la bobina y los cables de conexión tienen una resistencia R, lo que hace que la energía del campo electromagnético se vaya convirtiendo poco a poco en energía interna del conductor.

2.3. Analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas

Las oscilaciones eléctricas en un circuito se asemejan a las oscilaciones mecánicas libres, por ejemplo, a las oscilaciones de una bolita sujeta a un muelle. Este parecido se refiere no a la naturaleza de las propias magnitudes que cambian con periodicidad, ya que en las oscilaciones mecánicas varían periódicamente la coordenada x del cuerpo y la proyección v_x de su velocidad, mientras que en las oscilaciones eléctricas varían la carga q del condensador y la intensidad i de la corriente en el circuito. Resultan similares los procesos de variación periódica de las magnitudes. La igualdad del carácter de las variaciones de las magnitudes (mecánicas y eléctricas) se explica porque existe analogía entre las condiciones que originan las oscilaciones mecánicas y eléctricas. El retorno a la posición de equilibrio de la bolita sujeta al muelle se debe a la fuerza de elasticidad F_x que es proporcional a la elongación de la bolita. El coeficiente de proporcionalidad es la rigidez k del muelle. La descarga del condensador (y la aparición de la corriente) está condicionada por la tensión

u entre las placas del condensador, la cual es proporcional a la carga q. El coeficiente de proporcionalidad, en este caso, es la magnitud $1/C$, recíproca de la capacidad, ya que $u = q/C$.

De un modo semejante a como, debido a la inercia, la velocidad de la bolita sólo aumenta paulatinamente bajo la acción de la fuerza y no se anula de inmediato después de cesar dicha acción, la corriente eléctrica en la bobina, a causa del fenómeno de la autoinducción, aumenta paulatinamente bajo la acción de la tensión y no desaparece de golpe cuando dicha tensión se anula. La inductancia L del circuito desempeña la misma función que la masa m del cuerpo en la mecánica. Esto se ve con más claridad cuando se comparan las expresiones de la energía cinética del cuerpo $mv_x^2/2$ y de la energía de la corriente $Li^2/2$

A la carga del condensador por la batería corresponde, en el caso de las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle, la comunicación a ésta de la energía potencial $kx_m^2/2$ cuando la bolita se desplaza (con la mano, por ejemplo) hasta la distancia x_m de su posición de equilibrio (fig. 26, *a*; la posición de equilibrio se indica mediante la raya izquierda vertical). Comparando esta expresión con la correspondiente a la energía del condensador $q_m^2/2C$, se advierte que la rigidez k del muelle desempeña en el proceso oscilatorio MECÁNICO el mismo papel que la magnitud recíproca de la capacidad $1/C$ en las oscilaciones ELÉCTRICAS, y la coordenada inicial x_m, el de la carga q_m.

Al surgimiento de la corriente i en el circuito eléctrico a expensas de la diferencia de potencial, corresponde la aparición en el sistema oscilante mecánico de la velocidad v_x bajo la acción de la fuerza de elasticidad del muelle (fig. 26, *b*); además la intensidad de la corriente alterna en un instante dado es, por definición, la derivada de la carga respecto del tiempo.

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'$$

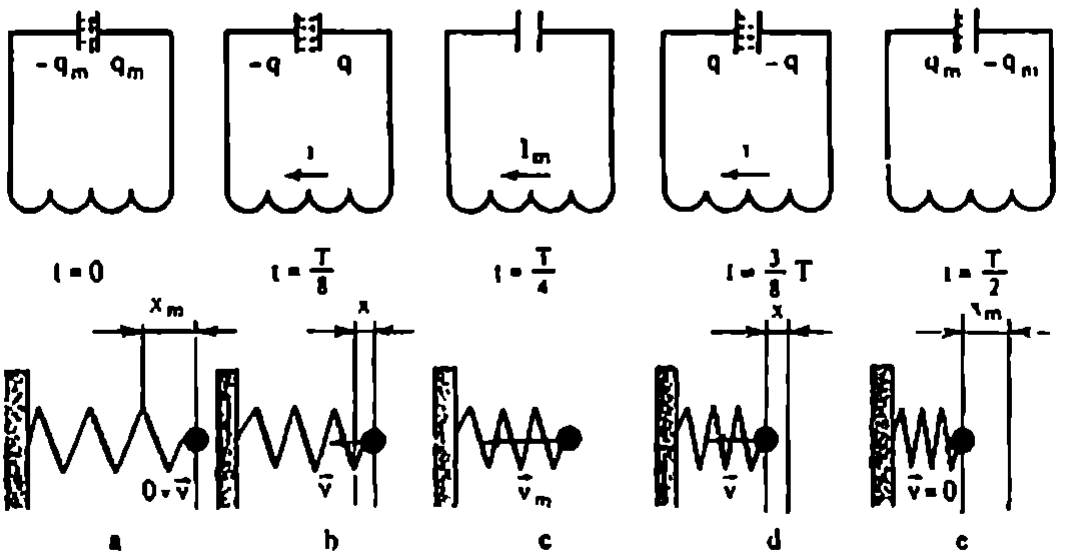


Fig 26

4 608

Al instante en que el condensador se descarga y la intensidad de la corriente alcanza el máximo, corresponde el paso de la bolita por la posición de equilibrio con la velocidad máxima (fig. 26, *c*).

Después el condensador comienza a recargarse, y la bolita a desplazarse hacia la izquierda desde la posición de equilibrio (fig. 26, *d*). Al cabo de un tiempo igual a $T/2$ el condensador resulta totalmente cargado y la intensidad de la corriente se anula. A este estado corresponde la posición extrema izquierda de la bolita, en la cual su velocidad es nula (fig. 26, *e*). La correspondencia mutua entre las magnitudes mecánicas y eléctricas se ilustra con la tabla 1.

Tabla 1

Magnitudes mecánicas	Magnitudes eléctricas
Coordenada, x	Carga, q
Velocidad, v_x	Intensidad de la corriente, I
Aceleración, $a_x = v'_x$	Velocidad de variación de la intensidad de la corriente, I'
Masa, m	Inductancia, L
Rigidez del muelle, k	Magnitud recíproca de la capacidad, $1/C$
Energía potencial, $\frac{kx^2}{2}$	Energía del campo eléctrico, $\frac{q^2}{2C}$
Energía cinética, $\frac{mv_x^2}{2}$	Energía del campo magnético, $\frac{LI^2}{2}$

2.4. Período de las oscilaciones eléctricas libres. Ecuación de definición de los procesos en el circuito oscilante

Pasamos ahora a la teoría cuantitativa de los procesos que se desarrollan en el circuito oscilante

FÓRMULA DE THOMSON Nuestra tarea va a consistir, en primer lugar, en determinar el período (o la frecuencia) de las oscilaciones eléctricas libres. Es cierto que, basándose en la analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas libres, se puede escribir directamente la expresión para la frecuencia y el período de estas últimas oscilaciones. Efectivamente, como en la fórmula de la frecuencia angular de las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, la magnitud k es análoga a la $1/C$, y m, a la inductancia L, la frecuencia de las oscilaciones eléctricas libres debe ser

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (2.3)$$

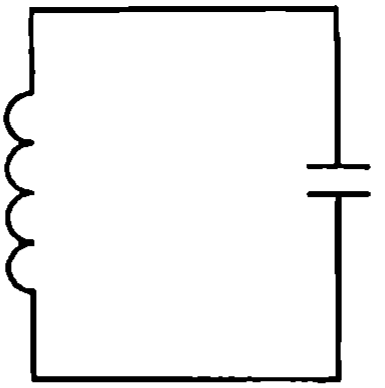


Fig. 27

Para el período de las oscilaciones libres en el circuito se puede escribir,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \qquad (2.4)$$

La fórmula (2.4) se llama fórmula de Thomson, en honor del físico inglés W. Thomson, que fue el primero en deducirla.

Los resultados así obtenidos son correctos. No obstante, no pueden considerarse demostrados con suficiente rigurosidad. Hay que demostrar que la ecuación que define las oscilaciones eléctricas en el circuito no difiere, desde el punto de vista matemático, de la ecuación que define las oscilaciones mecánicas libres. Sólo después de esto podremos afirmar con absoluta seguridad que las oscilaciones mecánicas y eléctricas se rigen por las mismas leyes cuantitativas. Esto es lo más importante.

ECUACIÓN DE DEFINICIÓN DE LOS PROCESOS EN EL CIRCUITO OSCILANTE. Consideremos un circuito oscilante (fig. 27) cuya resistencia R pueda despreciarse. La ecuación que describe las oscilaciones eléctricas libres en este circuito se puede obtener por medio de la ley de conservación de la energía.

La energía electromagnética total W del circuito en cualquier instante es igual a la suma de las energías de los campos magnético y eléctrico.

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \qquad (2.5)$$

Esta energía no cambia con el tiempo, si la resistencia R del circuito es nula.

La derivada de la energía total respecto del tiempo es nula, ya que la energía es constante. Por consiguiente, es nula la suma de las derivadas respecto del tiempo de las energías de los campos magnético y eléctrico:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

o bien

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \qquad (2.6)$$

El sentido físico de la ecuación (2.6) consiste en que el módulo de la velocidad con que varía la energía del campo magnético es igual al módulo de la

velocidad con que varía la energía del campo eléctrico; el signo "menos" indica que cuando la energía del campo eléctrico aumenta, la energía del campo magnético disminuye (y viceversa). Precisamente por esto la energía total no varía

Calculando las dos derivadas de la ecuación (2.6), se obtiene:

$$\frac{L}{2}\,2ii' = -\frac{1}{2C}\cdot 2qq' \tag{2.7}$$

Pero la derivada de la carga respecto del tiempo es la intensidad de la corriente: $q' = i$. Por lo tanto la ecuación (2.7) se puede escribir de la forma siguiente

$$Li'i = -\frac{qi}{C} \tag{2.8}$$

La derivada de la intensidad de la corriente respecto del tiempo no es más que la segunda derivada de la carga respecto de éste, de modo semejante a como la derivada de la velocidad (aceleración) es la segunda derivada de la coordenada respecto del mismo. Sustituyendo $i' = q''$ en la ecuación (2.8) y dividiendo los dos miembros de ésta por Li, obtenemos la ecuación fundamental que define las oscilaciones eléctricas libres en el circuito:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q \tag{2.9}$$

Ahora, por fin, ya puede usted apreciar plenamente la importancia de los esfuerzos hechos para estudiar las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle y del péndulo. Observe que la ecuación (2.9), a excepción de las designaciones, no se diferencia en nada de la (1.11), que define las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle. Sustituyendo en la ecuación (1.11) x por q, x'' por q'', k por $1/C$ y m por L se obtiene exactamente la ecuación (2.9). Pero la ecuación (1.11) ya la hemos resuelto. Por eso, sabiendo cómo oscila la bolita, podemos decir inmediatamente cómo ocurren las oscilaciones en el circuito.

En la ecuación (1.11) el coeficiente k/m es el cuadrado de la frecuencia propia de las oscilaciones. Del mismo modo, el coeficiente $1/(LC)$ en la ecuación (2.9) también es el cuadrado de la frecuencia angular de las oscilaciones eléctricas. Por consiguiente, las fórmulas (2.3) y (2.4) de la frecuencia y del período de las oscilaciones eléctricas pueden considerarse demostradas rigurosamente. Es natural que sin necesidad de ningunas ecuaciones hubiéramos podido intuir que el período T debe aumentar al crecer L y C. En efecto, al crecer L la corriente aumenta más lentamente con el tiempo y desciende más despacio hasta anularse.

Y cuanto mayor es la capacidad, tanto más tiempo es necesario para la recarga del condensador. Pero obtener la fórmula (2.4) sin la (2.9) y sin recurrir a la analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas, hubiera sido imposible.

OSCILACIONES ARMÓNICAS DE LA CARGA Y DE LA CORRIENTE. Lo mismo que la coordenada en las oscilaciones mecánicas (en caso de que en el instante inicial la elongación es la máxima) varía con el tiempo

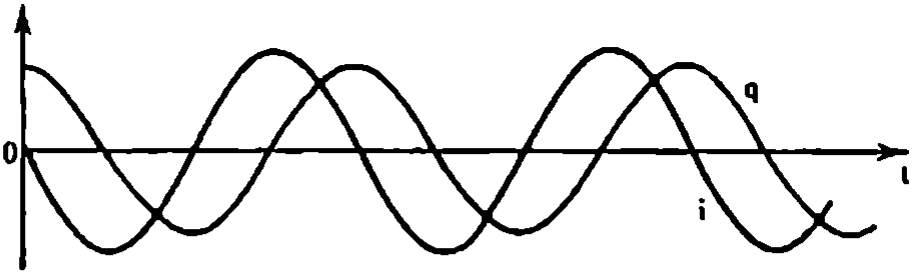


Fig. 28

según la ley armónica

$$x = x_m \cos \omega_0 t,$$

la carga del condensador varía con el tiempo de acuerdo con esta misma ley:

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \tag{2.10}$$

en la que q_m es la amplitud de las oscilaciones de la carga.

La intensidad de la corriente también oscila armónicamente.

$$i = q' = -q_m \omega_0 \operatorname{sen} \omega_0 t = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \tag{2.11}$$

donde $I_m = q_m \omega_0$ es la amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente. Las oscilaciones de la intensidad de la corriente están desfasadas en $\pi/2$ respecto de las oscilaciones de la carga (fig. 28), de un modo semejante a como la fase de las oscilaciones de la velocidad, durante el movimiento de la bolita sujeta al muelle, adelanta en $\pi/2$ a la fase de las oscilaciones de la coordenada.

En realidad, a causa de las pérdidas de energía, las oscilaciones serán amortiguadas. Cuanto mayor sea la resistencia R, tanto mayor será el período de las oscilaciones. Si la resistencia es suficientemente grande, las oscilaciones no se producen en absoluto. El condensador se descarga, pero no tendrá lugar su recarga.

¿ ?

1. ¿En qué consiste la diferencia entre las oscilaciones eléctricas libres y las forzadas?
2. Explique la analogía entre las oscilaciones eléctricas en un circuito y las oscilaciones del péndulo simple.
3. ¿Cómo variará el período de las oscilaciones libres, si el condensador con capacidad C del circuito se sustituye por una batería de dos condensadores idénticos al primero? Considerar los casos en que los condensadores se acoplan en paralelo y en serie.
4. ¿Cómo están relacionadas entre sí las amplitudes de las oscilaciones de la carga y de la corriente, cuando un condensador se descarga a través de una bobina?

2.5. Corriente eléctrica alterna

Las oscilaciones eléctricas libres en un circuito se amortiguan con rapidez y por eso prácticamente no se utilizan. En cambio, las oscilaciones forzadas no amortiguadas (o mantenidas) tienen una enorme importancia práctica

Fig. 29

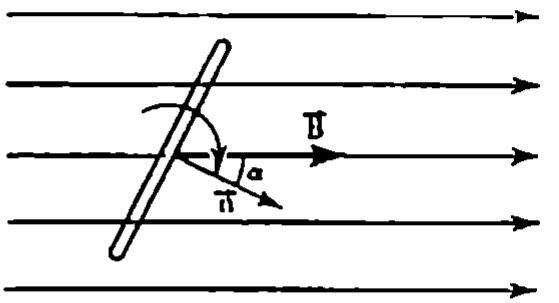


Fig. 30

La corriente alterna de la red del alumbrado doméstico y de las fábricas no es otra cosa sino oscilaciones eléctricas forzadas. La intensidad de la corriente varía con el tiempo según la ley armónica

Esto se pone de manifiesto fácilmente valiéndose de un oscilógrafo Si a las placas de desviación verticales del oscilógrafo se aplica la tensión de la red, el barrido del tiempo sobre la pantalla será una sinusoide (fig. 29) Conociendo la velocidad con que se mueve el rayo por la pantalla en sentido horizontal (determinada por la frecuencia de la tensión "en diente de sierra"), se puede hallar la frecuencia de las oscilaciones. Esta frecuencia es igual a 50 Hz. Esto significa que en el transcurso de un segundo la corriente pasa 50 veces en un sentido y 50 veces en el opuesto. La frecuencia de 50 Hz para la corriente industrial ha sido adoptada en muchos países del mundo No obstante, en algunos países, por ejemplo en EE.UU., se emplea otra frecuencia industrial, la de 60 Hz.

Si la tensión en los extremos del circuito varía según la ley armónica, la intensidad del campo eléctrico dentro de los conductores variará también armónicamente. Estas variaciones armónicas de la intensidad del campo provocan oscilaciones armónicas de la velocidad del movimiento ordenado de las partículas cargadas y, por consiguiente, oscilaciones armónicas de la intensidad de la corriente

Es cierto que, al variar la tensión en los extremos del circuito, el campo eléctrico varía no instantáneamente en todo el circuito. Las variaciones del campo se propagan a una velocidad muy grande, pero no infinita.

Sin embargo, cuando el tiempo de propagación del campo en el circuito es mucho menor que el período de las oscilaciones de la tensión, puede considerarse que el campo eléctrico varía inmediatamente en todo el circuito al

variar la tensión en los extremos de éste. Con esto la intensidad de la corriente en un instante dado tiene prácticamente el mismo valor en todas las secciones de un circuito no ramificado

La tensión alterna en los enchufes de la red del alumbrado la crean los generadores en las centrales eléctricas. El cuadro de alambre, girando en el campo magnético continuo (véase 2.1), se puede considerar como un modelo muy simplificado de generador de corriente alterna. El flujo de inducción magnética Φ que atraviesa el cuadro de alambre, cuya superficie es S (véase el curso de "Física 3"), es proporcional al coseno del ángulo α entre la normal al cuadro y el vector inducción magnética (fig. 30):

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

Al girar el cuadro con la velocidad angular ω constante, el ángulo aumenta en proporción directa con el tiempo:

$$\alpha = \omega t.$$

Por eso el flujo de inducción magnética varía armónicamente

$$\Phi = BS\cos\omega t$$

De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, la f. e. m. inducida en el cuadro es igual a la velocidad con que varía la inducción magnética tomada con signo "menos", es decir, a la derivada del flujo de inducción magnética respecto del tiempo:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos\omega t)' = BS\omega\,\mathrm{sen}\,\omega t = \mathscr{E}_m\,\mathrm{sen}\,\omega t,$$

donde $\mathscr{E}_m = BS\omega$ es la amplitud de la f. e. m. inducida

En adelante, vamos a estudiar las oscilaciones electromagnéticas forzadas, que tienen lugar en los circuitos bajo la acción de una tensión que varía armónicamente con la frecuencia ω según la ley sinusoidal o cosinusoidal:

$$u = U_m\cos\omega t, \qquad (2.12)$$

en la que U_m es la amplitud de la tensión[1].

Si la tensión varía con la frecuencia ω, la intensidad de la corriente en el circuito variará con esa misma frecuencia. Pero la fase de las oscilaciones de la corriente no tiene que coincidir necesariamente con la fase de las oscilaciones de la tensión, lo mismo que la fase de las oscilaciones de la velocidad, en las oscilaciones mecánicas forzadas, hablando en general, no coincide con la fase de las oscilaciones de la fuerza. Por esta razón, en el caso general, la intensidad de la corriente i en un instante cualquiera (valor instantáneo de la intensidad de la corriente) se determina por la fórmula

$$i = I_m\cos(\omega t + \varphi). \qquad (2.13)$$

Aquí I_m es la amplitud de la intensidad de la corriente; φ, la diferencia de fase (defasaje) entre las oscilaciones de la corriente y las de la tensión

---

[1] La sustitución del seno por el coseno significa que la fase inicial de la tensión varía en $\pi/2$. Cuando se trata de oscilaciones forzadas esto carece de importancia

2.6. Resistencia óhmica en un circuito de corriente alterna. Valor eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión

INTENSIDAD DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA ÓHMICA. Pasemos a conocer con más detalle lo que ocurre en un circuito conectado a una fuente de tensión alterna.

Supongamos que el circuito está formado por los cables de conexión y una carga de poca inductancia y gran resistencia R (fig. 31). A esta magnitud, que hasta ahora hemos venido llamando resistencia eléctrica o simplemente resistencia, la llamaremos *resistencia óhmica* o *resistencia activa*.

Esto se debe a que en el circuito de corriente alterna pueden haber resistencias de distinto carácter. La resistencia R se llama activa porque, cuando esta resistencia existe, el circuito absorbe energía suministrada por el generador. Más adelante veremos esto.

Vamos a considerar que la tensión en los extremos del circuito varía según la ley armónica

$$u = U_m \cos \omega t$$

Lo mismo que en el caso de la corriente continua, el valor instantáneo de la intensidad de la corriente es proporcional al valor instantáneo de la tensión. Por eso, para hallar el valor instantáneo de la intensidad de la corriente puede aplicarse la ley de Ohm:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I \cos \omega t. \qquad (2.14)$$

En un conductor con resistencia óhmica las oscilaciones de la intensidad de la corriente coinciden en fase con las oscilaciones de la tensión (fig. 32), y la amplitud de dicha intensidad se determina por la igualdad

$$I_m = \frac{U_m}{R} \qquad (2.15)$$

POTENCIA EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA ÓHMICA. En un circuito de corriente alterna de frecuencia industrial (50 Hz), la intensidad de la corriente y la tensión varían con relativa rapidez. Por eso cuando la corriente

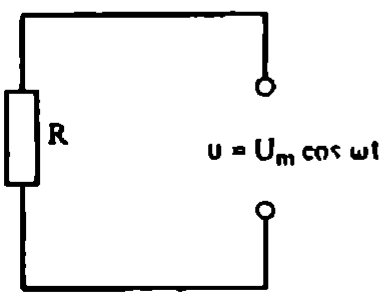


Fig. 31

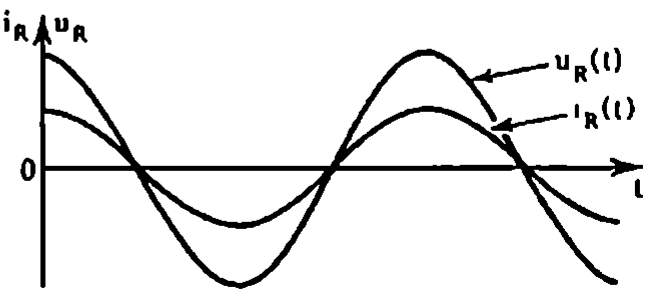


Fig. 32

pasa por un conductor, por ejemplo, por el filamento de una lámpara eléctrica, la cantidad de energía que se desprende también varía rápidamente con el tiempo. Pero de estas variaciones rápidas no nos damos cuenta.

Por regla general, en todos los casos hay que conocer la POTENCIA MEDIA de la corriente en un trozo de circuito durante un intervalo de tiempo que comprende muchos períodos. Para eso basta hallar la potencia media en un período (en los sucesivos períodos ingresa en la red esta misma energía). Se entiende por potencia media de la corriente alterna en un período, la razón de la energía total, que entra en el circuito durante el período, a la duración de éste.

La potencia en un circuito de corriente continua en un trozo cuya resistencia sea R se determina por la fórmula

$$P = I^2 R \tag{2.16}$$

En el transcurso de un intervalo de tiempo muy pequeño la corriente alterna se puede considerar invariable. Por eso la potencia instantánea en un circuito de corriente alterna en un trozo, cuya resistencia óhmica sea R, se halla por la fórmula

$$p = i^2 R \tag{2.17}$$

Hallemos el valor medio de la potencia durante un período. Para esto, primeramente se transforma la fórmula (2.17), sustituyendo en ella la expresión de la intensidad de la corriente (2.14), $i = I_m \cos \omega t$, y utilizando la relación, conocida de las matemáticas, $\cos^2 \alpha = (1 + \cos 2\alpha)/2$

$$p = \frac{I_m^2}{2} R(1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t \tag{2.18}$$

La gráfica de la potencia instantánea en función del tiempo se da en la fig. 33 con línea de color. En el transcurso de un cuarto de período, cuando $\cos 2\omega t > 0$, la potencia en todo instante es mayor que la magnitud $I_m^2 R/2$. En cambio, en el transcurso del siguiente cuarto de período, cuando $\cos 2\omega t < 0$, la potencia en cualquier instante es menor que la magnitud $I_m^2 R/2$. Como resultado, la energía desprendida durante medio período es igual al área del rectángulo $oabc$, y la potencia media, igual a $I_m^2 R/2$.

Este resultado se obtiene porque el valor medio de $\cos 2\omega t$ durante un período es nulo. En el transcurso de un cuarto de período toma esta función una serie de valores positivos, y en el transcurso del siguiente cuarto de período, toma la misma serie de valores negativos.

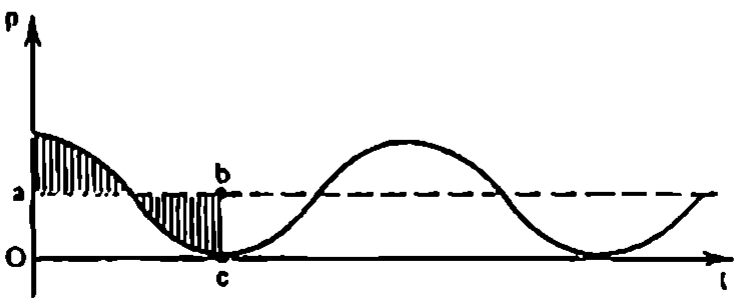


Fig. 33

Así, pues, la potencia media $\bar{p}$ es igual al primer término de la fórmula (2.18):

$$\bar{p} = \overline{i^2}R = \frac{I_m^2}{2}R. \tag{2.19}$$

VALOR EFICAZ DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE Y DE LA TENSIÓN. En la fórmula (2.19) se ve que la magnitud $I_m^2/2$ es el valor medio durante un período del cuadrado de la intensidad de la corriente:

$$\overline{i^2} = \frac{I_m^2}{2}. \tag{2.20}$$

La magnitud igual a la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la intensidad de la corriente se llama valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna. El valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna se designa por I

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \tag{2.21}$$

Siempre se puede elegir un valor tal de la intensidad de la corriente continua que, la energía, desprendida durante cierto tiempo por esta corriente en el trozo cuya resistencia es R, sea igual a la energía desprendida, durante este mismo tiempo, por la corriente alterna. Para esto es necesario que la intensidad de la corriente continua sea igual al valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna.

El valor eficaz de la tensión alterna se determina de modo análogo al valor eficaz de la intensidad de la corriente.

$$U = \sqrt{\overline{u^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \tag{2.22}$$

Sustituyendo en la fórmula (2.15) los valores de la amplitud de la intensidad de la corriente y de la tensión por sus valores eficaces, se obtiene

$$I = \frac{U}{R}. \tag{2.23}$$

Esta es la ley de Ohm para un trozo de circuito de corriente alterna con resistencia óhmica.

Lo mismo que en las oscilaciones mecánicas, en el caso de las oscilaciones eléctricas no nos suelen interesar los valores de la corriente, de la tensión y de las otras magnitudes en cada instante. Son importantes las características generales de las oscilaciones, tales como la amplitud, el período, la frecuencia, los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión y la potencia media. Precisamente los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión son los que registran los amperímetros y los voltímetros de corriente alterna.

Es claro que también se hubiera podido caracterizar la corriente y la tensión alternas por sus amplitudes. Pero los valores eficaces son más convenientes en el sentido de que ellos determinan directamente el valor medio $\bar{p}$ de la potencia de la corriente alterna o, como suele decirse, simplemente la potencia P de la

corriente alterna en el trozo de circuito:

$$P = I^2R = UI.$$

¿ ?

1. ¿En qué condiciones se producen en un circuito eléctrico oscilaciones eléctricas forzadas?
2. ¿Cómo están relacionadas la intensidad de la corriente alterna y la tensión en un circuito con resistencia óhmica (activa)?
3. En las redes de alumbrado de corriente alterna se utilizan tensiones de 220 y 127 V. ¿Cuáles son las amplitudes de la tensión en estas redes?
4. ¿A qué se llama valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión?

2.7. Capacidad en un circuito de corriente alterna

La corriente continua no puede existir en un circuito que contenga un condensador, porque de hecho, en este caso, el circuito resulta abierto, ya que las armaduras del condensador están separadas por un dieléctrico.

La corriente alterna, en cambio, es capaz de pasar por un circuito en el que haya un condensador. De esto es fácil cerciorarse por medio de un simple experimento. Supongamos que se dispone de una fuente de tensión constante y de otra fuente de tensión alterna, siendo la tensión constante en los bornes de la fuente igual al valor eficaz de la tensión alterna. El circuito está formado por un condensador y una lámpara de incandescencia (fig. 34) unidos en serie. Cuando se conecta la tensión constante, la lámpara no se enciende. Pero si se conecta la tensión alterna, la lámpara se enciende si la capacidad del condensador es suficientemente grande.

¿Cómo puede pasar la corriente alterna por el circuito si éste está abierto en realidad (ya que entre las placas del condensador no pueden desplazarse las cargas)? En esencia, aquí se produce la carga y descarga periódicas del condensador bajo la acción de la tensión alterna. La corriente que pasa por el circuito, mientras se recarga el condensador, calienta el filamento de la lámpara.

Hallemos cómo varía con el tiempo la intensidad de la corriente en un circuito, constituido por un solo condensador, si la resistencia de los conductores y de las armaduras del condensador se puede despreciar (fig. 35).

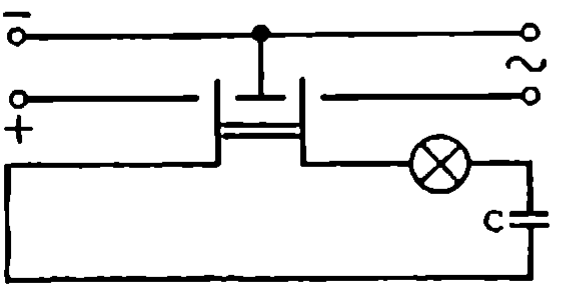


Fig. 34

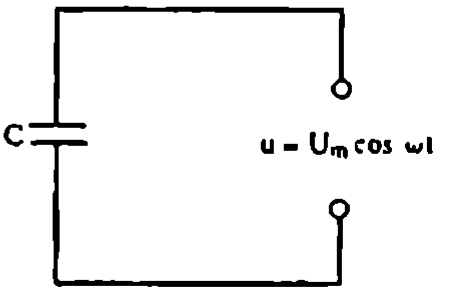


Fig. 35

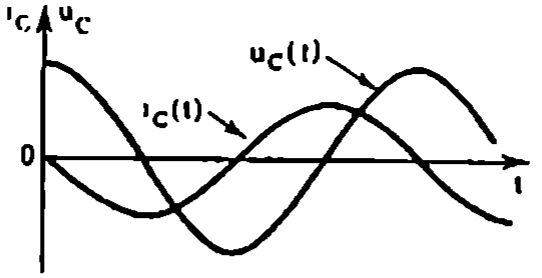


Fig. 36

La tensión en el condensador

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

será igual a la tensión en los extremos del circuito. Por consiguiente,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t$$

La carga del condensador varía de acuerdo con la ley armónica:

$$q = CU_m \cos \omega t. \tag{2.24}$$

La intensidad de la corriente, igual a la derivada de la carga respecto del tiempo, es

$$i = q' = -U_m C \omega \operatorname{sen} \omega t = U_m C \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.25}$$

Por consiguiente, las oscilaciones de la intensidad de la corriente adelantan en $\pi/2$ a las oscilaciones de la tensión en el condensador (fig. 36). Esto significa que en el instante en que el condensador empieza a cargarse, la intensidad de la corriente es máxima y la tensión es nula. Una vez que la tensión llega al máximo, la intensidad de la corriente se anula y así sucesivamente.

La amplitud de la intensidad de la corriente es

$$I_m = U_m \omega C. \tag{2.26}$$

Si se introduce la designación

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \tag{2.27}$$

y en vez de la amplitud de la intensidad de la corriente y de la tensión se aplican sus valores eficaces, se obtiene:

$$\boxed{I = \frac{U}{X_C}} \tag{2.28}$$

La magnitud X_C, recíproca del producto de la frecuencia angular por la capacidad eléctrica del condensador, se llama reactancia de capacidad o capacitancia. El papel que desempeña esta magnitud es análogo al de la

resistencia óhmica R en la ley de Ohm (2.23). El valor eficaz de la intensidad de la corriente está relacionado con el valor eficaz de la tensión en el condensador exactamente lo mismo que, de acuerdo con la ley de Ohm, están relacionadas la intensidad de la corriente y la tensión en un trozo de circuito de corriente continua. Esto permite considerar la magnitud X_C como la resistencia del condensador a la corriente alterna (capacitancia).

Cuanto mayor sea la capacidad del condensador, tanto mayor será, según la fórmula (2.26), la corriente de recarga. Esto es fácil de apreciar por el incremento de la luminosidad de la lámpara si aumentamos la capacidad del condensador. Mientras que la resistencia del condensador a la corriente continua es infinita, su resistencia a la corriente alterna tiene un valor finito X_C. Al crecer la capacidad, la resistencia disminuye. También disminuye cuando aumenta la frecuencia.

Esto puede verse si para alimentar el circuito representado en la fig. 34 se utiliza un generador de corriente alterna de frecuencia regulable. Elevando de manera gradual la frecuencia de la corriente alterna se puede observar como aumenta la luminosidad de la lámpara. Esto se debe al crecimiento de la intensidad de la corriente a causa de la disminución de la capacitancia X_C del condensador. La luminosidad de la lámpara también aumenta cuando crece la capacidad del condensador.

Si a una de las entradas de un osciló grafo de doble haz se aplica la tensión del condensador y a la otra entrada, la tensión cuyo valor instantáneo es proporcional a la intensidad de la corriente en el circuito (esta tensión se toma de la resistencia óhmica), en la pantalla se observan al mismo tiempo los oscilogramas de ambas oscilaciones, es decir, de la tensión y de la intensidad de la corriente. Estas observaciones confirman la deducción antes hecha de que las oscilaciones de la intensidad de la corriente en el circuito del condensador adelantan en fase a las oscilaciones de la tensión, como viene mostrado en la fig. 36.

En conclusión señalaremos que, en el transcurso del cuarto de período en que el condensador se carga hasta la tensión máxima, la energía entra en el circuito y se almacena en el condensador en forma de energía del campo eléctrico. En el cuarto de período siguiente, durante la descarga del condensador, esta energía retorna a la red.

2.8. Inductancia en un circuito de corriente alterna

La inductancia en el circuito influye en la intensidad de la corriente alterna. Esto se puede demostrar con un experimento sencillo. Montemos un circuito formado por una bobina de gran inductancia y una lámpara eléctrica de incandescencia (fig. 37). Por medio de un conmutador se puede conectar este circuito a una fuente de tensión constante o a una fuente de tensión alterna. La tensión constante y el valor eficaz de la tensión alterna deben ser iguales entre sí. La experiencia muestra que la lámpara brilla más en el caso de la tensión constante. Por consiguiente, el valor eficaz de la

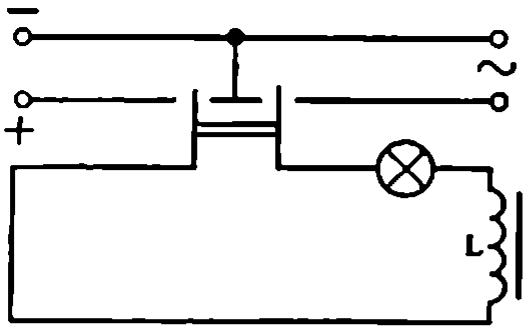


Fig. 37

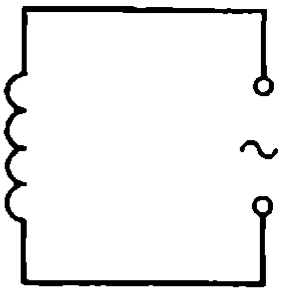


Fig. 38

intensidad de la corriente alterna en el circuito considerado es menor que la intensidad de la corriente continua.

Esto se explica por el fenómeno de la autoinducción. Por el curso de Física 3° ya se sabe que, cuando se conecta una bobina a una fuente de tensión constante, la intensidad de la corriente en el circuito crece paulatinamente. El campo eléctrico rotacional que se produce al aumentar la intensidad de la corriente frena el movimiento de los electrones. Sólo al cabo de cierto tiempo la intensidad de la corriente alcanza el valor máximo (de equilibrio), correspondiente a la tensión constante dada.

Si la tensión varía rápidamente, la intensidad de la corriente no tiene tiempo de alcanzar el valor de equilibrio que adquiriría con el tiempo para una tensión constante igual al valor máximo de la tensión alterna.

Por consiguiente, el valor máximo de la intensidad de la corriente alterna (su amplitud) está limitado por la inductancia L del circuito y será tanto menor cuanto mayor sea la inductancia y mayor la frecuencia de la tensión aplicada.

Vamos a determinar la intensidad de la corriente en un circuito en el cual hay una bobina, cuya resistencia óhmica se puede despreciar (fig. 38). Para esto se halla previamente la relación entre la tensión en la bobina y la f. e. m. autoinducida en ella.

Si la resistencia de la bobina es nula, la intensidad del campo eléctrico dentro del conductor en cualquier instante también debe ser nula. De lo contrario la intensidad de la corriente, de acuerdo con la ley de Ohm, sería infinita. La igualdad a cero de la intensidad del campo resulta ser posible porque la intensidad del campo rotacional eléctrico $\vec{E}_i$, generado por el campo magnético alterno, es en cada punto igual en módulo y tiene sentido contrario a la intensidad del campo coulombiano $\vec{E}_c$, creado en el conductor por las cargas, que se encuentran en los bornes de la fuente y en los conductores del circuito.

De la igualdad $\vec{E}_i = -\vec{E}_c$ se sigue que el trabajo del campo rotacional en transportar una carga positiva unitaria (o sea, la f. e. m. de autoinducción e_i) tiene el mismo módulo y signo contrario que el trabajo del campo coulombiano. Tomando en consideración que el trabajo del campo coulombiano es igual a la tensión en los extremos de la bobina, se puede escribir:

$$e_i = -u.$$

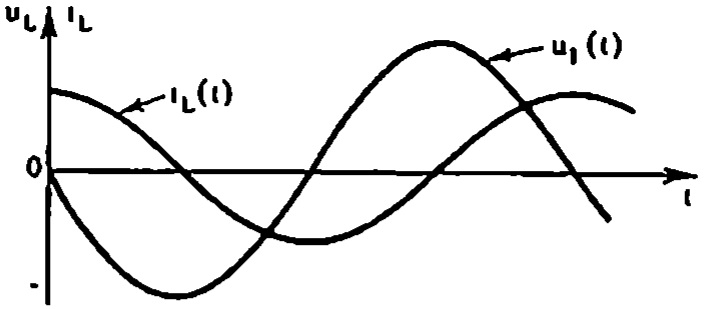


Fig. 39

Si la intensidad de la corriente varía según la ley armónica

$$i = I_m \operatorname{sen} \omega t,$$

la f.e.m. autoinducida será

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t \tag{2.29}$$

Y como $u = -e_i$, la tensión en los extremos de la bobina se determina así:

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.30}$$

donde $U_m = L\omega I_m$ es la amplitud de la tensión.

Por lo tanto, las oscilaciones de la tensión en la bobina adelantan a las oscilaciones de la intensidad de la corriente en $\pi/2$, o lo que es lo mismo, las oscilaciones de la intensidad de la corriente se retrasan, respecto de las de la tensión, en $\pi/2$.

En el instante en que la tensión en la bobina llega al máximo, la intensidad de la corriente es nula (fig. 39). Y en el instante en que la tensión se anula, la intensidad de la corriente tiene su módulo máximo.

La amplitud de la intensidad de la corriente en la bobina es

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \tag{2.31}$$

Si se introduce la designación

$$\omega L = X_L \tag{2.32}$$

y en vez de las amplitudes de la intensidad de la corriente y de la tensión se utilizan sus valores eficaces, se obtiene.

$$\boxed{I = \frac{U}{X_L}.} \tag{2.33}$$

La magnitud X_L, igual al producto de la frecuencia angular por la inductancia, se llama reactancia inductiva[1].

[1] También se conoce con el nombre de resistencia inductiva y, a veces con el de inductancia del circuito (N. del T.).

De acuerdo con la fórmula (2.33), el valor eficaz de la intensidad de la corriente está ligado con el valor eficaz de la tensión y la reactancia inductiva por una relación semejante a la ley de Ohm para un circuito de corriente continua.

La reactancia inductiva depende de la frecuencia. La corriente continua no "nota" en absoluto la inductancia de la bobina. Cuando $\omega = 0$ la reactancia inductiva es nula ($X_L = 0$). Cuanto más de prisa varía la tensión, tanto mayor es la f.e.m. autoinducida y tanto menor la amplitud de la intensidad de la corriente.

Esto no es difícil de observar si para alimentar el circuito representado en la fig. 37 se toma un generador de corriente alterna con frecuencia regulable. Al mismo tiempo debe preverse también la posibilidad de variar la inductancia de la bobina (por ejemplo, conectando distinto número de espiras). Al aumentar la frecuencia o la inductancia, la intensidad de la corriente en el circuito disminuye y se debilita la luminosidad de la lámpara. Esto pone de manifiesto que la resistencia del circuito aumenta cuando crecen L y ω.

El desplazamiento de fase (defasaje) entre la intensidad de la corriente y la tensión también puede observarse por el método del cual se habló en el párrafo anterior.

* * *

En el caso general, en que el circuito tenga resistencia óhmica, capacidad e inductancia, acopladas en serie, las oscilaciones de la intensidad de la corriente, como regla, estarán desfasadas respecto de las oscilaciones de la tensión (véase la fórmula 2.13). El defasaje depende de la frecuencia de la corriente alterna ω, de la inductancia L, de la capacidad C y de la resistencia óhmica R del circuito. La amplitud de la intensidad de la corriente será, como antes, proporcional a la amplitud de la tensión y vendrá determinada por los parámetros del circuito: ω, R, L y C.

¿ ?

1. ¿Aplicando qué fórmulas se calculan la capacidad y la reactancia inductiva?
2. ¿Cómo están relacionados los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión en el condensador en un circuito de corriente alterna?
3. ¿Cómo están relacionados los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión en una bobina de inductancia, cuya resistencia óhmica se puede omitir?

2.9. Resonancia en un circuito eléctrico

Al estudiar las oscilaciones mecánicas forzadas se dio a conocer un fenómeno importante, la *resonancia*. Este fenómeno se observa cuando la frecuencia propia de las oscilaciones del sistema coincide con la frecuencia de las variaciones de la fuerza exterior. Si el rozamiento es

pequeño, la amplitud de las oscilaciones forzadas estables aumenta bruscamente.

La coincidencia de las leyes de las oscilaciones mecánicas y electromagnéticas permite llegar inmediatamente a la conclusión de que la resonancia es posible en un circuito eléctrico, si éste es un circuito oscilante y posee una determinada frecuencia propia de oscilación

En las oscilaciones mecánicas la resonancia se manifiesta claramente cuando los valores del coeficiente de rozamiento μ son pequeños En el circuito eléctrico el papel del coeficiente de rozamiento lo desempeña la resistencia óhmica R. Precisamente esta resistencia del circuito es la que hace que la energía de la corriente se transforme en energía interna del conductor (el conductor se calienta). Por eso la resonancia en un circuito oscilante eléctrico deberá manifestarse claramente cuando la resistencia óhmica R sea pequeña.

Si la resistencia óhmica es pequeña, la frecuencia propia de las oscilaciones en el circuito se define por la fórmula

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

La intensidad de la corriente en las oscilaciones forzadas debe alcanzar sus valores máximos cuando la frecuencia de la tensión alterna, aplicada al circuito, sea igual a la frecuencia propia del sistema oscilante:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (2.34)$$

Se llama resonancia en un circuito oscilante eléctrico el fenómeno del brusco crecimiento de la amplitud de las oscilaciones forzadas, cuando coincide la frecuencia de la tensión alterna exterior con la frecuencia propia del circuito oscilante.

AMPLITUD DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE DE RESONANCIA. Lo mismo que en el caso de la resonancia mecánica, durante la resonancia en el circuito oscilante se crean las condiciones óptimas para la admisión de energía de la fuente exterior por el circuito La potencia en el circuito es máxima en el caso en que la intensidad de la corriente coincide en fase con la tensión Aquí existe una analogía total con las oscilaciones mecánicas: durante la resonancia, en el sistema oscilante mecánico la fuerza exterior (parámetro análogo a la tensión en el circuito) coincide en fase con la velocidad (parámetro análogo a la intensidad de la corriente)

El valor de resonancia de la intensidad de la corriente se establece no inmediatamente después de conectar la tensión exterior alterna al circuito Las oscilaciones se van haciendo estables poco a poco. La amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente aumenta hasta que la energía que se desprende durante un periodo, a causa de la resistencia R, se equilibre con la energía que percibe el circuito en el mismo tiempo.

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m I_m}{2}$$

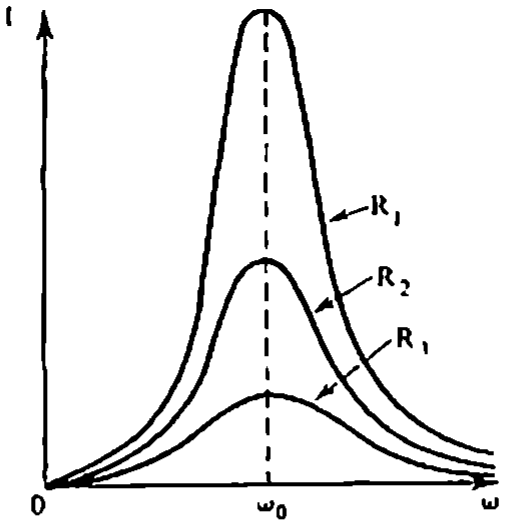


Fig. 40

De aquí la amplitud de las oscilaciones estables de la intensidad de la corriente durante la resonancia se determina por la ecuación

$$I_m R = U_m. \tag{2.35}$$

Esta ecuación es totalmente análoga a la $v_m \mu = I_m$ (véase el § 1.9), que define la amplitud de las oscilaciones de la velocidad en la resonancia mecánica.

De acuerdo con la ecuación (2.35), la amplitud de las oscilaciones de resonancia de la intensidad de la corriente es:

$$I_m = \frac{U_m}{R} \tag{2.36}$$

Cuando $R \to 0$ el valor de resonancia de la intensidad de la corriente crece ilimitadamente: $I_{res} \to \infty$. Y al contrario, con el aumento de R el valor máximo de la intensidad de la corriente disminuye, y cuando los valores de R son gran-

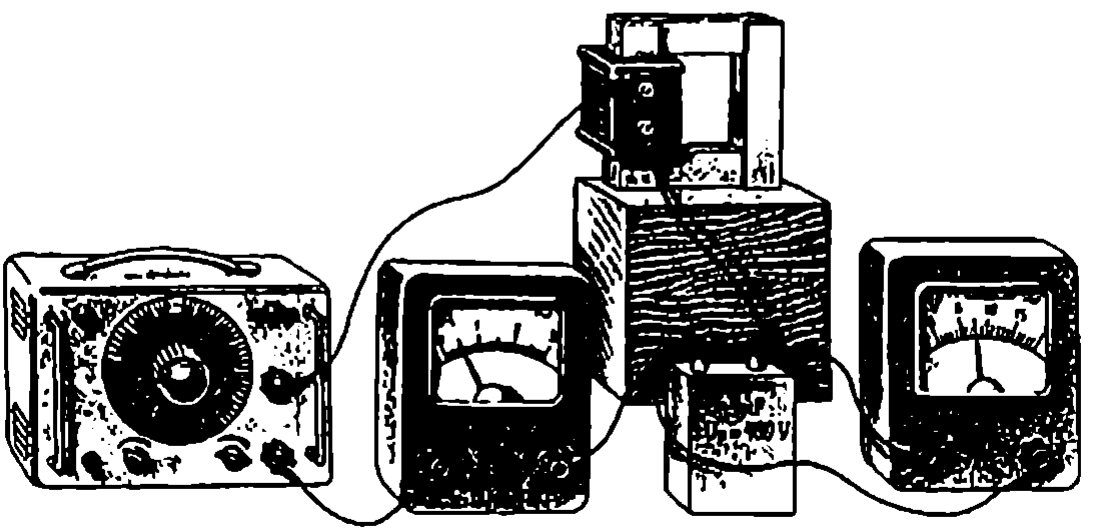


Fig. 41

des carece de sentido hablar de resonancia. Las gráficas de la amplitud de la intensidad de la corriente en función de la frecuencia, para distintas resistencias ($R_1 < R_2 < R_3$), se dan en la fig. 40

AMPLITUD DE LA TENSIÓN DE RESONANCIA. Al mismo tiempo que crece la intensidad de la corriente, durante la resonancia aumenta bruscamente la tensión en el condensador y en la bobina de inductancia. Estas tensiones se igualan y superan en muchas veces la tensión exterior.

En efecto,

$$U_{C,m} = I_m \frac{1}{\omega_0 C} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad U_{L,m} = I_m \omega_0 L = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

La tensión exterior está relacionada con la corriente de resonancia así:

$$U_m = I_m R.$$

Si

$$R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

resulta que

$$U_{C,m} = U_{L,m} \gg U_m.$$

Para observar la resonancia en un circuito eléctrico se monta la instalación que se muestra la fig. 41. En ella se utiliza una fuente exterior de tensión alterna de frecuencia regulable. Aumentando poco a poco la frecuencia de las oscilaciones de la tensión exterior se puede observar cómo varía la intensidad de la corriente en el circuito, midiéndola con el amperímetro, y la tensión en el condensador o en la bobina de inductancia, midiéndola con el voltímetro. Estas magnitudes aumentan durante la resonancia decenas e incluso centenares de veces

APLICACIÓN DE LA RESONANCIA EN LA RADIOCOMUNICACIÓN. El fenómeno de la resonancia se aprovecha, en particular, para efectuar la radiocomunicación. Las ondas radioeléctricas (hertzianas) procedentes de distintas emisoras excitan en la antena del aparato receptor corrientes alternas de diferentes frecuencias (fig. 42), ya que cada emisora funciona con su frecuencia. Con la antena está acoplado por inducción un circuito oscilante. En virtud de la inducción electromagnética, en la bobina del circuito oscilante se generan las fuerzas electromotrices alternas de las

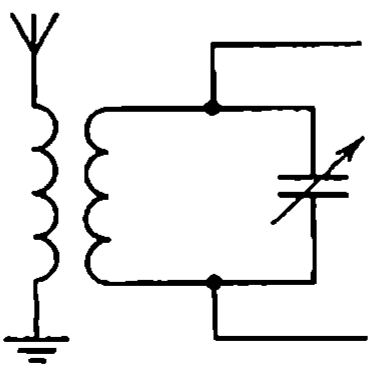


Fig. 42

respectivas frecuencias y las oscilaciones forzadas de la corriente de estas mismas frecuencias Pero solamente cuando se produce la resonancia las oscilaciones de la corriente y de la tensión en el circuito serán importantes. Teniendo esto en cuenta, se dice que de las oscilaciones de todas las frecuencias excitadas en la antena, el circuito oscilante separa únicamente las oscilaciones cuya frecuencia es igual a la frecuencia propia del circuito. El ajuste del circuito oscilante a la frecuencia ω_0 necesaria se efectúa generalmente variando la capacidad del condensador En esto consiste la sintonización del receptor a una emisora determinada.

NECESIDAD DE TENER EN CUENTA LA POSIBILIDAD DE LA RESONANCIA EN EL CIRCUITO ELÉCTRICO En ciertos casos la resonancia en el circuito eléctrico puede acarrear un gran perjuicio Si el circuito no ha sido calculado para que funcione en las condiciones de la resonancia, la aparición de ésta ocasiona averías. Las intensidades de corriente excesivamente grandes pueden recalentar los conductores. Las grandes tensiones ocasionan la perforación (ruptura) del aislamiento Este tipo de averías era frecuente en el siglo pasado, cuando aún se comprendían mal las leyes de las oscilaciones eléctricas y no se sabían calcular correctamente los circuitos eléctricos

2.10. Lámpara electrónica de tres electrodos

Antes de pasar al estudio de otro tipo de oscilaciones eléctricas, llamadas *autooscilaciones* u *oscilaciones autoexcitadas*, debemos conocer la estructura de la lámpara (válvula) electrónica de tres electrodos, denominada *triodo*.

En el curso de "Física 3" (Ed. MIR) se explicó la estructura y la acción del diodo o válvula electrónica de dos electrodos Los dos electrodos de esta última, el cátodo y el ánodo, se encuentran en una ampolla de la cual se extrae el aire. El catodo, caldeado por la corriente, emite electrones y alrededor de él se forma una nube de carga espacial negativa. Bajo la acción del campo eléctrico de la válvula, dirigido del ánodo al cátodo, los electrones de esta nube se lanzan hacia el ánodo y originan una corriente eléctrica.

El triodo tiene además un electrodo adicional, la rejilla. Ésta se sitúa entre el catodo y el ánodo, pero mucho más cerca del cátodo. Su mismo nombre, "rejilla", indica que este electrodo no es continuo y puede dejar pasar los electrones lanzados desde el cátodo hacia el ánodo. La rejilla, en la mayoría de las válvulas electrónicas, es una armazón de alambre en forma de línea helicoidal (fig. 43) sujeta a unos soportes. La representación convencional del triodo se muestra en la fig. 44.

Si entre la rejilla y el cátodo se crea una diferencia de potencial (tensión de rejilla), entre estos electrodos se produce un campo eléctrico. Este campo influye fuertemente en la cantidad de electrones que llegan al ánodo, es decir, en la intensidad de la corriente que pasa por la válvula (intensidad de la corriente anódica) La particularidad principal del triodo consiste en la posibilidad de regular la corriente anódica variando la diferencia de potencial entre la rejilla y el cátodo.

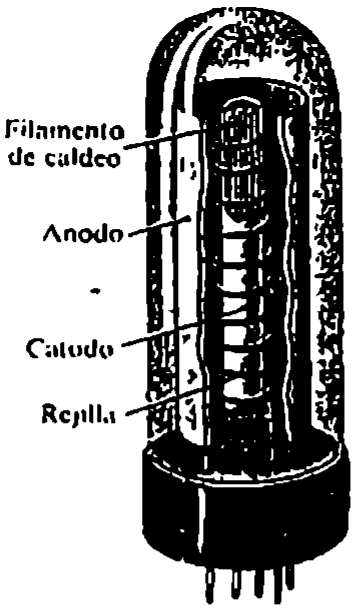


Fig. 43

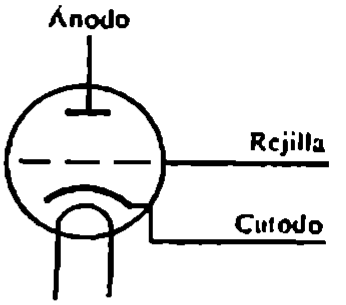


Fig. 44

En la fig. 45 se muestra la gráfica de la intensidad de la corriente anódica I_a en función de la tensión de rejilla U_r, para una tensión anódica (diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo) U_a invariable. Esta gráfica recibe el nombre de característica de rejilla de la válvula. Esta característica se puede obtener experimentalmente. Para esto se utiliza el dispositivo cuyo esquema se da en la fig. 46.

Por la característica de rejilla se ve que el aumento del potencial de rejilla (respecto del cátodo) hace que crezca la corriente anódica. Cuando disminuye el potencial de rejilla, la intensidad de la corriente anódica, por el contrario, decrece. La corriente anódica se interrumpe (la válvula se cierra) si el potencial en la rejilla disminuye hasta cierto valor U_b. Este potencial, llamado *potencial de bloqueo* de la válvula, depende de la estructura de esta y de la tensión anódica.

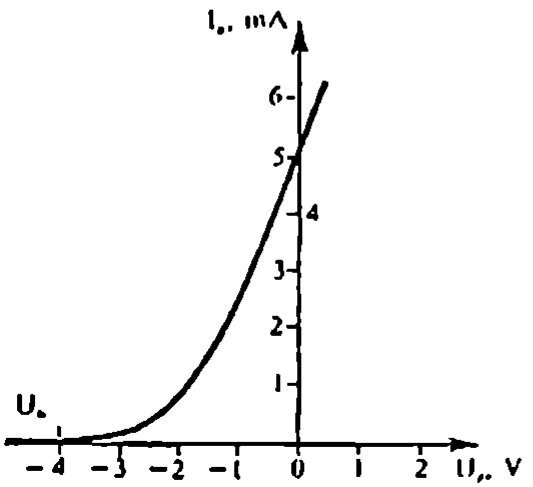


Fig. 45

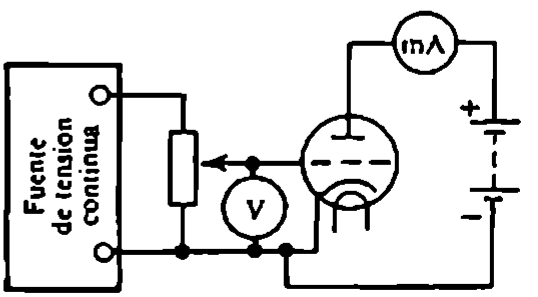


Fig. 46

La característica de rejilla que se da en la fig. 45 se explica como sigue. El campo eléctrico de la rejilla cargada positivamente actúa sobre los electrones de la nube de carga espacial con una fuerza dirigida hacia el ánodo. Como resultado, la nube electrónica se disipa. Por eso la mayor parte de los electrones, que emite el cátodo, pasan por entre las espiras de la rejilla. La corriente anódica será mayor. Cuando el potencial de rejilla es negativo, el campo eléctrico entre la rejilla y el cátodo tiene sentido contrario. Con esto la carga espacial negativa que hay alrededor del cátodo aumenta y sólo la menor parte de los electrones, emitidos por el cátodo, pasa por entre las espiras de la rejilla hacia el ánodo. En este caso la corriente anódica será menor

Debido a que la rejilla está situada a poca distancia del cátodo, una variación de ΔU_r en la tensión de rejilla hace que la intensidad del campo eléctrico, que actúa sobre la nube electrónica junto al cátodo, cambie mucho más que al variar la tensión anódica en la misma magnitud[1]. Según esto, iguales variaciones ΔI_a de la corriente anódica se consiguen con variaciones mucho menores (decenas de veces menores) de la tensión de rejilla que de la tensión anódica. En esto consiste la propiedad más importante del triodo, que da la posibilidad de utilizarlo en diversos dispositivos radiotécnicos: amplificadores, osciladores de lámpara, etc.

2.11. Oscilador de lámpara

Las oscilaciones eléctricas forzadas que hemos estudiado hasta ahora se originan bajo la acción de la tensión alterna, que producen los generadores en las centrales eléctricas

Pero estos generadores son incapaces de crear las oscilaciones de alta frecuencia que se utilizan en radiotecnia, ya que para eso se necesitaría que los rotores girasen con una velocidad excesivamente grande.

Las oscilaciones de alta frecuencia se obtienen por medio de otros dispositivos, uno de los cuales es el *oscilador de lámpara* (o *de válvula*), llamado así porque una de sus partes esenciales es una lámpara (válvula) de tres electrodos, es decir, un triodo.

El oscilador de lámpara es un sistema autooscilante, en el cual se excitan oscilaciones no amortiguadas a expensas de la energía de una fuente de tensión continua, por ejemplo, de una batería de pilas o de un rectificador. En este sentido el oscilador de lámpara se asemeja a un reloj, en el cual las oscilaciones no amortiguadas del péndulo se mantienen a cuenta de la energía de las pesas subidas o del muelle tenso.

El oscilador de lámpara consta de un circuito oscilante, formado por una bobina de inductancia L y un condensador de capacidad C. Sabemos que si el condensador se carga, en el circuito se producen oscilaciones amortiguadas.

---

[1] Recuérdese que la intensidad del campo eléctrico se determina por la fórmula $E = U/d$ (en la que U es la tensión entre dos puntos sobre una línea de intensidad; d, la distancia entre estos puntos).

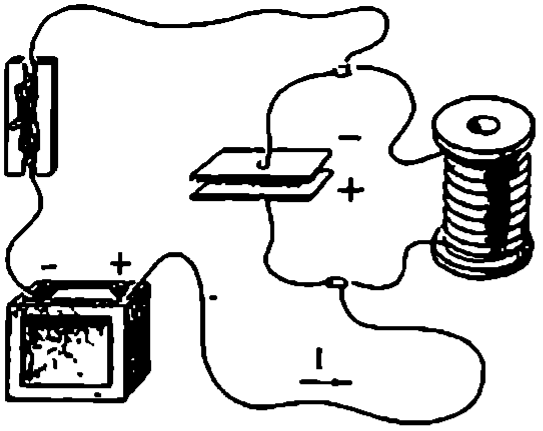


Fig. 47

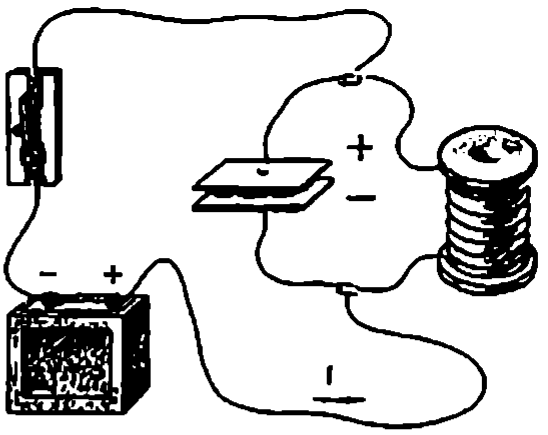


Fig. 48

Para que las oscilaciones no se amortiguen hay que compensar las pérdidas de energía en cada período

La energía en el circuito se puede reponer volviendo a cargar el condensador. Para eso se conecta periódicamente el circuito, durante cierto intervalo de tiempo, a una fuente de tensión continua. Si en el transcurso del intervalo de tiempo, en que el interruptor está cerrado, los signos de las cargas en las armaduras del condensador están de acuerdo con la fig. 47, al recargar el condensador el campo eléctrico de las cargas que hay en sus armaduras realiza trabajo negativo y la energía del condensador aumenta[1]

En cambio, si durante el período de tiempo, en que el interruptor está cerrado, los signos de las cargas que hay en las armaduras del condensador están de acuerdo con la fig. 48, el campo eléctrico de dichas cargas realizará trabajo positivo. La energía del condensador disminuirá en este caso y aquél se descargará parcialmente.

Por lo tanto, una fuente de tensión continua conectada todo el tiempo al circuito no puede mantener en él las oscilaciones no amortiguadas. Durante medio período la energía entrará en el circuito, y en el medio período siguiente saldrá de él

Pero si por medio de un interruptor se conecta la fuente de corriente al circuito oscilante solamente en aquellos semiperíodos en que tiene lugar suministro de energía al circuito (véase la fig. 47), se establecen las oscilaciones no amortiguadas. Está claro que para esto es necesario conseguir que el interruptor (o la válvula, como suele decirse) funcione automáticamente. Como se trata de oscilaciones de frecuencia muy alta, el interruptor debe poseer una enorme rapidez de acción. En calidad de interruptor prácticamente sin inercia se utiliza un triodo (fig. 49).

Por el circuito anódico, al que está acoplado el circuito oscilante, debe pasar corriente en aquellos intervalos de tiempo en que la armadura del condensador, conectada al polo positivo de la fuente, esté cargada positivamente. Para eso las oscilaciones en el circuito deben controlar el potencial de la rejilla u_r, que

[1] Por la mecánica sabemos que si las fuerzas internas del sistema realizan trabajo negativo, la energía potencial del sistema aumenta

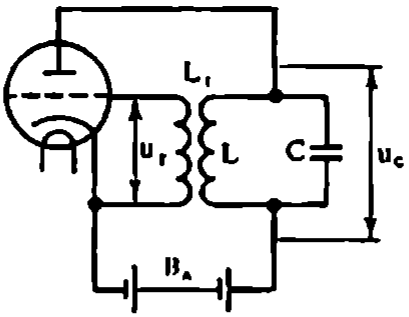


Fig. 49

regula la intensidad de la corriente en el circuito anódico. Se necesita una reacción[1]

La reacción en el oscilador de lámpara, cuyo esquema se da en la fig. 49, se llama inductiva. En el circuito de rejilla se intercala la bobina L_1, acoplada por inducción a la bobina del circuito oscilante. Las oscilaciones de corriente en este último, debido al fenómeno de la inducción electromagnética, hacen que se produzcan oscilaciones de la tensión en los extremos de la bobina L_1 y, por lo tanto, oscilaciones del potencial en la rejilla del triodo.

Si la fase de las oscilaciones de la corriente anódica se ha elegido correctamente, los "impulsos" de esta corriente actúan sobre el circuito oscilante en los instantes precisos y las oscilaciones no se amortiguan en el circuito.

Una vez que se cierra el circuito anódico, el condensador se carga y en el circuito oscilante empiezan las oscilaciones. Su amplitud aumenta hasta que las pérdidas de energía en el circuito oscilante son compensadas exactamente con la energía que procede del circuito anódico de la válvula.

La frecuencia de las oscilaciones en el circuito oscilante viene determinada por la inductancia L de la bobina y la capacidad C del condensador, de acuerdo con la fórmula de Thomson:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Cuando L y C son pequeñas, la frecuencia de las oscilaciones es grande.

La aparición de las oscilaciones en el oscilador (excitación del oscilador) se puede evidenciar valiéndose de un oscilógrafo, haciendo llegar a sus placas desviadoras verticales la tensión del condensador.

Tienen osciladores de lámpara todas las emisoras de radio y muchos dispositivos radiotécnicos.

Tomando como ejemplo el oscilador de lámpara se pueden destacar claramente los elementos esenciales característicos de los sistemas oscilantes (fig. 50):

1) una fuente de energía, a costa de la cual se mantienen las oscilaciones no amortiguadas (en el oscilador de lámpara es una fuente de tensión constante);

2) un dispositivo que regula el suministro de energía de la fuente, es decir, la

[1] En el reloj de péndulo la reacción se efectúa por medio del mecanismo de áncora.

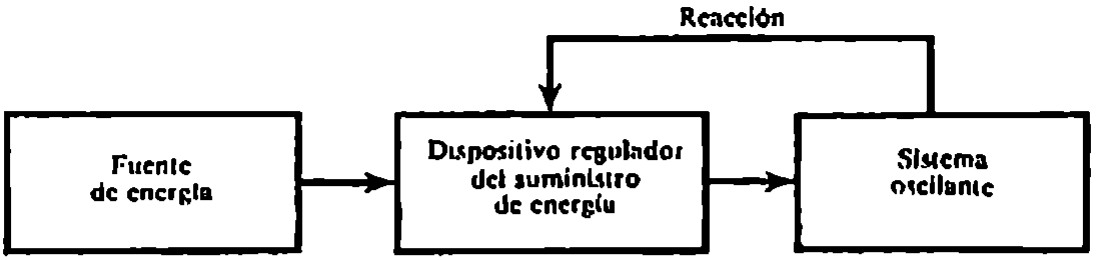


Fig 50

"válvula" (en el oscilador de lampara el papel de "valvula" lo desempeña el triodo),

3) un sistema oscilante, o sea, la parte del sistema autooscilante en que directamente se producen las oscilaciones (en el oscilador de lámpara éste es el circuito oscilante);

4) una reacción, por medio de la cual el sistema oscilante controla la "válvula" (en el oscilador de lámpara este papel lo desempeña el acoplamiento inductivo de la bobina del circuito oscilante con la bobina del circuito de rejilla).

* * *

Con esto concluimos el estudio de las oscilaciones mecánicas y electricas Es notable la identidad del carácter general de procesos de distinta naturaleza y la identidad de las ecuaciones matemáticas que los definen. Esta identidad, como se ha visto, facilita mucho el estudio de las oscilaciones

¿ ?

1 ¿Puede la amplitud de la intensidad de la corriente de resonancia, en un circuito con resistencia óhmica R, superar la intensidad de la corriente continua en un circuito con la misma resistencia óhmica y tensión constante, igual a la amplitud de la tensión alterna?
2. ¿A qué es igual la diferencia de fase entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión durante la resonancia?
3 ¿Cumpliendo qué condición las propiedades de la resonancia se ponen de manifiesto claramente?
4 ¿Qué función desempeña la rejilla en el triodo?
5 ¿Cómo se efectúa la reacción en el oscilador de lámpara?
6. Mencione (basándose en el ejemplo del oscilador de lámpara) los elementos fundamentales que componen un sistema autooscilante.

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1 La carga máxima en las armaduras del condensador de un circuito oscilante es $q_m = 10^{-6}$ C. El valor de la amplitud de la intensidad de la corriente en el circuito es $I_m = 10^{-3}$ A Determinar el periodo T de las oscilaciones Las pérdidas por calentamiento de los conductores se pueden despreciar

Solución. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, el valor máximo de la energía del campo eléctrico del condensador es igual al valor

máximo de la energía del campo magnético de la bobina:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

De donde

$$L = \frac{q_m^2}{I_m^2} \quad \text{o} \quad \sqrt{LC} = \frac{q_m}{I_m}$$

Por lo tanto,

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\frac{q_m}{I_m},$$

$$T \approx 6{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{s}.$$

PROBLEMA 2. Un cuadro cuya área $S = 3000\ \text{cm}^2$ tiene $N = 200$ espiras y gira en un campo magnético homogéneo cuya inducción $B = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ T. La f.e.m. máxima en el cuadro $\mathcal{E}_m = 1{,}5$ V. Determinar el tiempo T que tarda en dar una vuelta.

Solución. La amplitud de la f.e.m. inducida en una espira se determina por la fórmula

$$\varepsilon_m = BS\omega$$

Como las fuerzas electromotrices que se producen en cada espira del cuadro por separado se suman, para la amplitud de la f.e.m. del cuadro se tiene:

$$\mathcal{E}_m = NBS\omega.$$

De donde

$$\omega = \frac{\mathcal{E}_m}{NBS}.$$

El tiempo que tarda el cuadro en dar una vuelta se puede hallar así

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi NBS}{\mathcal{E}_m},$$

$$T \approx 3{,}8 \cdot 10^{-2}\ \text{s}.$$

PROBLEMA 3. Una bobina de reactancia inductiva $X_L = 500\ \Omega$ está conectada a una fuente de tensión alterna, cuya frecuencia $\nu = 1000$ Hz. El valor eficaz de la tensión $U = 100$ V. Determinar la amplitud de la intensidad de la corriente I_m en el circuito y la inductancia L de la bobina. La resistencia óhmica de la bobina se desprecia.

Solución. La reactancia inductiva de la bobina se expresa por la fórmula

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L$$

De donde

$$L = \frac{X_L}{2\pi\nu} = 0{,}08 \text{ H}.$$

Como la amplitud de la tensión se relaciona con su valor eficaz por la fórmula $U_m = U\sqrt{2}$, para la amplitud de la intensidad de la corriente se obtiene:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L} = \frac{U\sqrt{2}}{X_L} = 0{,}28 \text{ A}.$$

PROBLEMA 4. En un circuito de corriente alterna de frecuencia $\nu = 500$ Hz está intercalada una bobina cuya iductancia $L = 10$ mH. ¿Qué capacidad debe tener el condensador intercalado en este circuito para que se produzca la resonancia?

Solución. El circuito eléctrico a que se refieren las condiciones del problema es un circuito oscilante En este circuito se originará la resonancia cuando la frecuencia de la corriente alterna sea igual a la frecuencia propia del circuito oscilante ($\nu = \nu_0$). Pero

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

por lo que

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

De donde

$$C = \frac{1}{2\pi^2 L\nu^2},$$

$$C \approx 10\mu F$$

Ejercicio 2

1. Una vez que al condensador de un circuito oscilante se le comunica la carga $q = 10^{-5}$ C, en el circuito se producen oscilaciones amortiguadas ¿Qué cantidad de calor se desprenderá en el circuito durante el tiempo que transcurra hasta que las oscilaciones se amortigüen totalmente en él? La capacidad del condensador $C = 0{,}01$ μF
2. Un circuito oscilante está formado por una bobina de inductancia $L = 0{,}003$ H y un condensador plano constituido por dos placas, en forma de discos de radio $r = 1{,}2$ cm, situadas a la distancia $d = 0{,}3$ mm una de otra Determinar el período de las oscilaciones libres en el circuito. ¿Cómo variaría su período si el espacio entre las armaduras del condensador se llenara con un dieléctrico de permitividad $\varepsilon = 4$?
3. ¿Dentro de qué límites debe variar la inductancia de la bobina de un circuito oscilante para que la frecuencia de las oscilaciones varíe de 400 a 500 Hz? La capacidad del condensador es de 10 μF.
4. Hallar la amplitud de la f e m inducida en un cuadro, que gira en un campo magnético homogéneo, si la frecuencia de rotación es 50 r p s , el área del cuadro, 100 cm², y la inducción magnética, 0,2 T

5 En un cuadro de alambre cuya área $S = 100\ cm^2$ se excita una f.e.m. inducida de amplitud $\mathcal{E}_m = 1{,}4$ V. El número de espiras del cuadro $N = 200$. El cuadro gira a velocidad angular constante en un campo magnético homogéneo cuya inducción $B = 0{,}15$ T. En el instante inicial el plano del cuadro es perpendicular al vector $\vec{B}$. Determinar la f.e.m. inducida e en el cuadro al cabo de $t = 0{,}1$ s de haber empezado su movimiento.

6 Una bobina de inductancia $L = 0{,}08$ H está conectada a una fuente de tensión alterna de frecuencia $\nu = 1000$ Hz. El valor eficaz de la tensión $U = 100$ V. Determinar la amplitud I_m de la corriente del circuito.

7 En un circuito oscilante se produce la resonancia cuando la frecuencia de las oscilaciones $\nu = 400$ Hz. Si en paralelo al condensador, de capacidad $C_1 = 10^{-6}$ F, se acopla otro condensador de capacidad C_2, la frecuencia de resonancia viene a ser $\nu_2 = 100$ Hz. Determinar la capacidad C_2.

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 2

Durante las oscilaciones eléctricas tienen lugar variaciones periódicas de la carga eléctrica, de la intensidad de la corriente y de la tensión. Lo mismo que las oscilaciones mecánicas, las eléctricas se subdividen en libres, forzadas y autooscilaciones.

El sistema más simple en que se observan oscilaciones eléctricas libres es el circuito resonante. Éste consta de una bobina de alambre y un condensador. El condensador cargado desempeña un papel análogo al del muelle comprimido en las oscilaciones mecánicas, y la inductancia de la bobina, el papel de la masa del cuerpo oscilante. Las ecuaciones que describen las oscilaciones eléctricas tienen la misma forma que las ecuaciones de las oscilaciones mecánicas. El período de las oscilaciones armónicas libres en un circuito con pequeña resistencia óhmica R se determina por la fórmula de Thomson:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

en la que L es la inductancia de la bobina, C, la capacidad eléctrica del condensador.

Las oscilaciones forzadas, es decir, la corriente eléctrica alterna, se producen en el circuito bajo la acción de una tensión periódica exterior. Entre las oscilaciones de la tensión y de la intensidad de la corriente, en el caso general, existe un defasaje φ. En la resistencia óhmica R este defasaje es nulo. En el condensador las oscilaciones de la intensidad de la corriente adelantan a las de la tensión en $\pi/2$, y en la bobina, las oscilaciones de la intensidad de la corriente se retrasan con respecto a las de la tensión en $\pi/2$. La resistencia del condensador a la corriente alterna (reactancia capacitiva o capacitancia) se determina por la fórmula

$$X_C = \frac{1}{C\omega},$$

y la resistencia de la bobina de inductancia (reactancia inductiva) a la corriente

alterna, por la fórmula

$$X_L = L\omega$$

Cuando coincide la frecuencia de la tensión alterna exterior con la frecuencia propia del circuito oscilante se origina la resonancia, es decir, un aumento brusco de la amplitud de las oscilaciones forzadas de la intensidad de la corriente. La resonancia sólo se manifiesta claramente cuando la resistencia óhmica del circuito oscilante es pequeña. El defasaje entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y las oscilaciones de la tensión durante la resonancia es nulo. La amplitud de las oscilaciones estables de la intensidad de la corriente de resonancia se determina por la relación

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

Al mismo tiempo que aumenta la intensidad de la corriente tiene lugar un incremento brusco de la tensión en el condensador y en la bobina. El fenómeno de la resonancia eléctrica se aprovecha en la radiocomunicación. El circuito oscilante del receptor de radio separa, de entre todas las oscilaciones que se excitan en la antena, aquellas oscilaciones cuya frecuencia es igual a la frecuencia propia del circuito.

Las autooscilaciones se excitan en el circuito oscilante del oscilador de lámpara a expensas de la energía de una fuente de corriente continua. En el oscilador de lámpara se utiliza una válvula de tres electrodos (triodo), es decir, un tubo electrónico en el cual, además del cátodo y el ánodo, hay un electrodo de control o gobierno, la rejilla. Las oscilaciones en el circuito generan oscilaciones de la tensión de rejilla, las cuales, a su vez, regulan la intensidad de la corriente en el circuito anódico (reacción) El circuito anódico suministra al circuito oscilante la energía que compensa las pérdidas por resistencia óhmica de este último

3 PRODUCCIÓN, TRANSMISIÓN Y UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

3.1. Generación de energía eléctrica

La energía eléctrica posee ventajas indiscutibles frente a todas las demás formas de energía. Se puede transmitir a enormes distancias por cables, con pérdidas relativamente pequeñas, y distribuir convenientemente entre los consumidores. Pero lo más importante es que esta forma de la energía, valiéndose de dispositivos simples, se puede transformar en otras cualesquiera: mecánica, interna (calentamiento de cuerpos), luminosa, etc.

La *corriente alterna* tiene la ventaja, frente a la continua, de que su tensión e intensidad se pueden transformar dentro de límites muy amplios casi sin pérdidas de energía. Estas transformaciones son necesarias en muchos aparatos electro y radiotécnicos. La transformación de la tensión y la intensidad de la corriente es muy necesaria, en especial, cuando se tiene que transportar la energía eléctrica a grandes distancias.

La energía eléctrica se produce en los *generadores*, aparatos que transforman una forma determinada de la energía en eléctrica. A los generadores pertenecen las pilas voltaicas, las máquinas electrostáticas, las pilas o baterías termoeléctricas[1], las baterías solares que se utilizan en las naves cósmicas, etc. Se está investigando la posibilidad de crear generadores de tipos esencialmente nuevos. Por ejemplo, se estudian las llamadas pilas de combustible, en las cuales la energía que se libera como resultado de la reacción del hidrógeno con el oxígeno se transforma directamente en eléctrica. Se trabaja con éxito en la creación de generadores magnetohidrodinámicos (generadores MHD). En ellos se realiza la transformación directa de la energía mecánica de un chorro de gas ionizado incandescente (plasma), que se mueve en un campo magnético, en energía eléctrica.

El campo de aplicación de cada uno de los tipos de generadores de energía eléctrica enumerados se determina por sus características. Así, las máquinas electrostáticas crean una gran diferencia de potencial, pero son incapaces de producir en el circuito una intensidad de corriente algo importante. Las pilas voltaicas pueden proporcionar una intensidad de corriente grande, pero su acción es poco duradera.

En la actualidad el papel preponderante lo desempeñan los *generadores electromecánicos de inducción* para corriente alterna. En estos generadores la energía mecánica se transforma en eléctrica. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. La estructura de estos generadores

---

[1] En las baterías térmicas se aprovecha la propiedad que tienen dos contactos de materiales distintos, de crear f.e.m. a expensas de la diferencia de temperatura entre ellos.

es relativamente simple y permite obtener grandes intensidades de corriente con tensiones suficientemente elevadas.

En adelante, al hablar de generadores, vamos a referirnos precisamente a los electromecánicos de inducción.

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA. El principio básico del funcionamiento del generador de corriente alterna (también llamado alternador) fue ya estudiado en el § 2.5.

En la actualidad existen muchos tipos de generadores de inducción. Pero todos ellos tienen los mismos elementos fundamentales. Son éstos, PRIMERO, un electroimán o imán permanente que crea el campo magnético, y, SEGUNDO, un devanado en el cual se induce la f.e.m. alterna (en el modelo del generador estudiado era el cuadro giratorio). Como las fuerzas electromotrices que se inducen en las espiras acopladas en serie se suman, la amplitud de la f.e.m. en el cuadro es proporcional al número de espiras que hay en él. La f.e.m. inducida es también proporcional a la amplitud del flujo magnético variable $\Phi_m = BS$ que pasa a través de cada espira (véase el § 2.5).

Para obtener un flujo magnético grande, en los generadores se utiliza un sistema magnético casi cerrado, consistente en dos núcleos de acero electrotécnico especial. Los devanados que crean el campo magnético se encuentran en las ranuras de uno de los núcleos, y los devanados en los cuales se induce la f.e.m., en las ranuras del otro. Uno de los núcleos (de ordinario el interior), junto con su devanado, gira alrededor de un eje horizontal o vertical. Por eso se llama *rotor*. El núcleo en reposo, junto con su devanado, recibe el nombre de *estator*. El espacio entre los núcleos del estator y del rotor (entrehierro) se hace lo menor posible. Esto asegura el valor máximo del flujo de inducción magnética.

Como los núcleos de acero son conductores, durante el funcionamiento del generador se inducen en ellos corrientes de Foucault parásitas. Estas corrientes calientan inútilmente los núcleos. Las pérdidas de energía correspondientes hacen que disminuya el rendimiento del generador. Para debilitar las corrientes de Foucault y reducir las pérdidas de energía, los núcleos de los generadores se hacen de láminas de acero delgadas aisladas entre sí.

En el modelo de generador representado en la fig. 23 gira un cuadro de alambre, que es el rotor (aunque sin núcleo de hierro). El campo magnético lo crea un imán permanente en reposo. Está claro que también hubiera podido procederse al contrario, es decir, haciendo girar el imán y manteniendo en reposo el cuadro.

En los grandes generadores industriales gira precisamente el electroimán, que hace las veces de rotor, mientras que los devanados en que se induce la f.e.m. se encuentran en las ranuras del estator y permanecen en reposo. Para suministrar la corriente al rotor o conducirla de su devanado al circuito exterior hay que valerse de contactos corredizos. Para eso el rotor se provee de *anillos colectores* unidos a los extremos del devanado (fig. 51). Unas plaquitas fijas –*escobillas*–, que frotan con los anillos colectores, ponen en comunicación el devanado del rotor con el circuito exterior. La intensidad de la corriente en los devanados del electroimán, que crea el campo magnético, es mucho menor que la intensidad de la corriente que cede el generador al circuito exterior. Por eso la corriente generada conviene tomarla de los devanados en reposo y, por

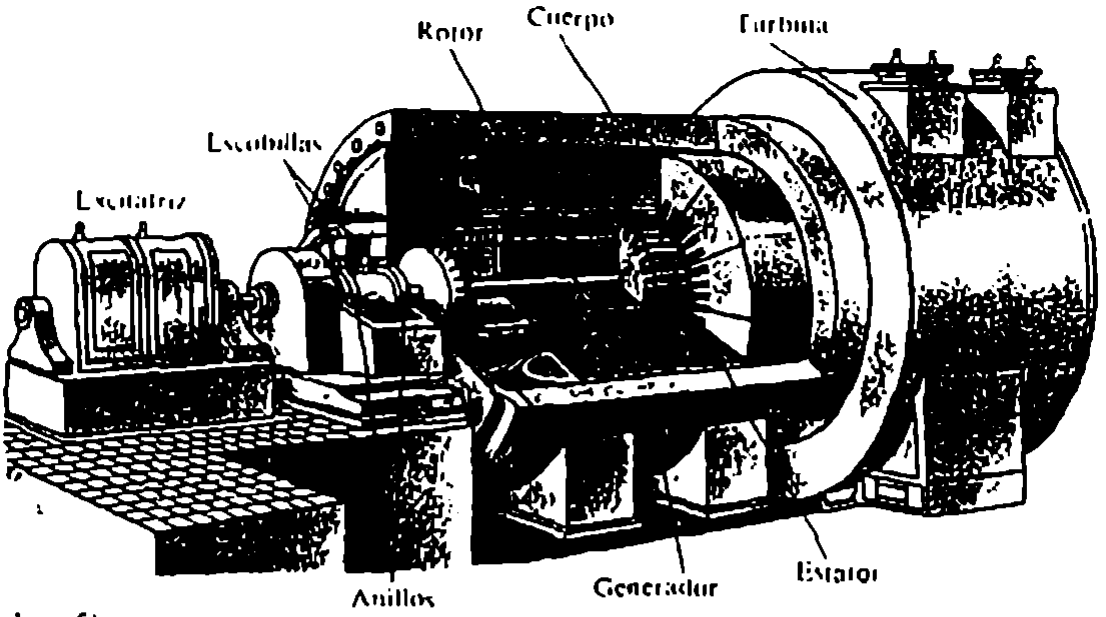


Fig. 51

medio de los contactos corredizos, suministrar la corriente relativamente débil al electroimán giratorio. Esta última corriente es producida por un generador independiente de corriente continua (excitatriz) acoplado al eje en directo[1].

En los generadores de pequeña potencia el campo magnético lo crea un imán permanente giratorio. En este caso no hacen falta los colectores ni las escobillas. La aparición de la f. e. m. en los devanados en reposo del estator se explica porque en ellos se produce un campo eléctrico rotacional, originado por la variación del flujo magnético debida a la rotación del rotor.

Si en un campo magnético homogéneo gira un cuadro plano, el período de la f. e. m. generada es igual al período de rotación del cuadro. Esto no es siempre conveniente. Por ejemplo, para obtener corriente alterna con 50 Hz de frecuencia, el cuadro debe realizar en el campo magnético homogéneo 50 r. p. s., es decir, 3000 r. p. m. Este número de revoluciones será necesario también en el caso de la rotación de un imán bipolar permanente o de un electroimán bipolar. En efecto, el período de variación del flujo magnético que atraviesa las espiras del devanado del rotor debe ser igual a 1/50 s. Para esto cada uno de los polos del rotor debe pasar junto a las espiras 50 veces por segundo. La velocidad de rotación se puede disminuir si como rotor se utiliza un electroimán que tenga 4, 6, 8, .. polos. Entonces el período de la corriente que se genera corresponderá al tiempo necesario para que el rotor gire, respectivamente, 1/2, 1/3, 1/4, ... de circunferencia. Por consiguiente, el rotor puede girar 2, 3, 4, veces más despacio. Esto tiene importancia cuando el generador es accionado por motores lentos, por ejemplo, por turbinas hidráulicas. Así, los rotores de los generadores de la central hidroeléctrica de Úglich, en el Volga, realizan 62,5 r. p. m. y tienen 48 pares de polos.

[1] En la actualidad la corriente continua para el devanado del rotor se toma en muchos casos del devanado del estator del mismo generador, a través de un rectificador.

3.2. Transformador

La f. e. m. de los potentes generadores de las centrales eléctricas suele ser bastante grande. Sin embargo, en la práctica se necesita de ordinario una tensión no demasiado alta.

La transformación de la corriente alterna, consistente en aumentar o disminuir la tensión varias veces sin pérdidas prácticas, se consigue con los *transformadores*.

El primero en utilizar los transformadores fue el científico ruso P. N. YABLOCHKOV, quien en 1878 los empleó para alimentar las "bujías eléctricas" inventadas por él, que en aquel tiempo eran una nueva fuente de luz. La idea de Yáblochkov fue desarrollada por el colaborador científico de la Universidad de Moscú I. F. USAGUIN, que construyó transformadores perfeccionados.

Un transformador consta de un núcleo de acero cerrado sobre el cual van montadas dos (y a veces más) bobinas con devanados o arrollamientos de alambre (fig. 52). Uno de los arrollamientos, llamado *primario*, se conecta con la fuente de tensión alterna. El otro arrollamiento, al cual se acopla la "carga", es decir, los aparatos y dispositivos consumidores de energía eléctrica, recibe el nombre de *secundario*. El esquema de la estructura del transformador con dos arrollamientos se da en la fig. 53, su representación convencional, en la fig. 54.

El funcionamiento del transformador se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Cuando por el arrollamiento primario pasa corriente alterna, en el núcleo aparece un flujo magnético alterno que excita f. e. m. inducida en cada arrollamiento. El núcleo, de acero para transformadores, concentra el campo magnético de tal modo, que el flujo magnético sólo existe prácticamente dentro de dicho núcleo y es igual en todas sus secciones.

El valor instantáneo de la f. e. m. inducida e en cualquier espira del arrollamiento primario o del secundario es el mismo. De acuerdo con la ley de Faraday, este valor se determina por la fórmula

$$e = -\Phi', \tag{3.1}$$

en la que Φ' es la derivada del flujo de inducción magnética respecto del tiempo.

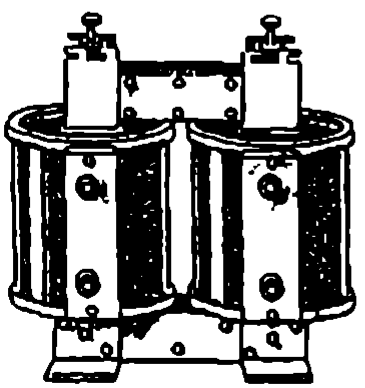


Fig. 52

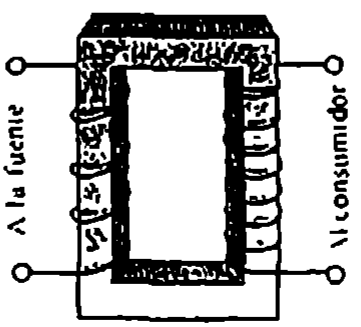


Fig. 53

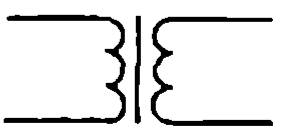


Fig. 54

Si $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, entonces

$$\Phi' = -\omega \Phi_m \operatorname{sen} \omega t. \tag{3.2}$$

Por consiguiente,

$$e = \omega \Phi_m \operatorname{sen} \omega t,$$

o bien

$$e = \mathcal{E}_m \operatorname{sen} \omega t,$$

siendo $\mathcal{E}_m = \omega \Phi_m$ la amplitud de la f.e.m. en una espira.

En el arrollamiento primario, que tiene n_1 espiras, la f.e.m. inducida total e_1 es igual a $n_1 e$. En el secundario la f.e.m. total e_2 es igual a $n_2 e$ (donde n_2 es el número de espiras de este arrollamiento). De aquí se sigue que

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}. \tag{3.4}$$

De ordinario la resistencia óhmica de los arrollamientos del transformador es pequeña y se puede despreciar. Por eso, como ya se explicó en el § 2.8,

$$u_1 \approx -e_1 \tag{3.5}$$

Cuando el arrollamiento secundario del transformador está abierto, la corriente no pasa por él y se cumple la relación

$$u_2 = -e_2 \tag{3.6}$$

Los valores instantáneos de las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 varían en coincidencia de fases (alcanzan el máximo al mismo tiempo y pasan por cero a la vez). Por lo tanto, su relación en la fórmula (3.4) se puede sustituir por la relación de los valores eficaces $\mathcal{E}_1$ y $\mathcal{E}_2$ de estas fuerzas electromotrices o, teniendo en cuenta las igualdades (3.5) y (3.6), por la relación de los valores eficaces de las tensiones U_1 y U_2.

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \tag{3.7}$$

La magnitud K se denomina *relación de transformación* o *coeficiente de ampliación*. Si $K > 1$, el transformador es reductor de tensión, y si $K < 1$, es elevador de tensión.

Cuando el arrollamiento secundario está abierto, el defasaje entre la intensidad de la corriente en el primario y la tensión que se suministra a este arrollamiento se aproxima a $\pi/2$ (véase el § 2.8). Por esta razón un transformador con resistencia óhmica pequeña en el primario casi no consume en este caso energía de la red.

Si a los extremos del arrollamiento secundario se conecta un circuito consumidor de energía eléctrica, o, como suele decirse, si se carga el transformador, la intensidad de la corriente en dicho arrollamiento ya no será nula. La corriente que se produce crea en el núcleo su propio flujo magnético alterno, el

cual, según la ley de Lenz, debe hacer que disminuya la variación del flujo magnético en el núcleo.

Pero la disminución de la amplitud de las oscilaciones del flujo magnético resultante debe, a su vez, hacer que disminuya la f.e.m. inducida en el arrollamiento primario. Sin embargo, esto es imposible, ya que según (3.5) $|u_1| = |e_1|$. Por eso, cuando se cierra el circuito del secundario, aumenta automáticamente la intensidad de la corriente en el primario. Su amplitud crece de tal modo, que tiende a restablecer el valor anterior de la amplitud de las oscilaciones del flujo magnético resultante. Al mismo tiempo disminuye el defasaje entre la tensión y la intensidad de la corriente en el arrollamiento primario

El aumento de la intensidad de la corriente en el circuito del arrollamiento primario se produce de acuerdo con la ley de conservación de la energía: la entrega de energía eléctrica al circuito conectado al arrollamiento secundario del transformador va acompañada del consumo de la misma cantidad de energía de la red por el arrollamiento primario. La potencia en el circuito primario debe ser igual, aproximadamente, a la potencia en el circuito secundario:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \tag{3.8}$$

De donde

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \tag{3.9}$$

Esto significa que si se eleva varias veces la tensión con el transformador, el mismo número de veces disminuye la intensidad de la corriente (y viceversa)

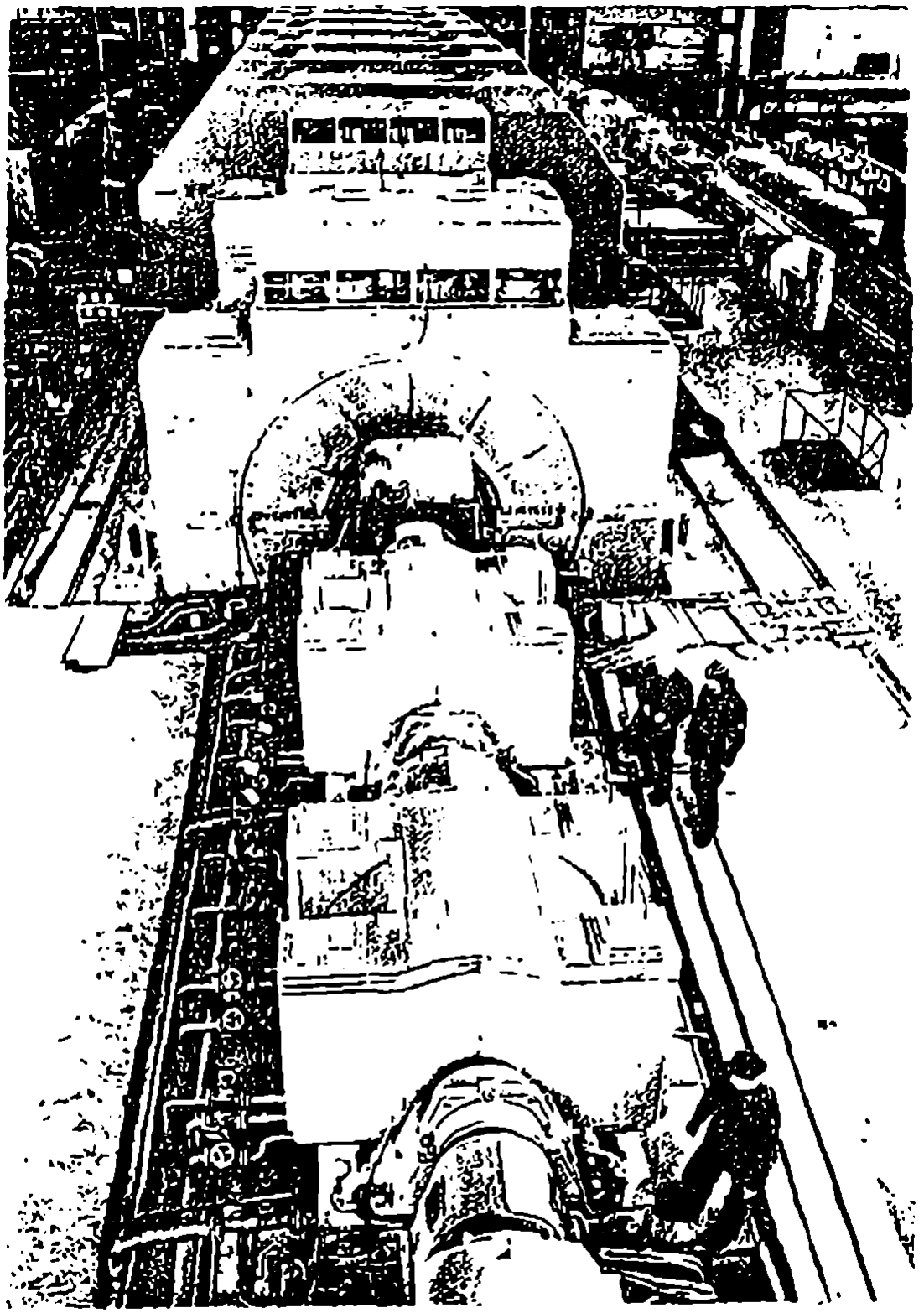
En los transformadores potentes modernos las pérdidas totales de energía no superan un 2-3%

3.3. Producción y utilización de la energía eléctrica

En nuestra época el nivel de producción y consumo de energía[1] es uno de los índices más importantes del desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad. El papel rector lo desempeña la energía eléctrica, que es la forma más universal y fácil de utilizar de la energía. Si el consumo de energía en el mundo se duplica, aproximadamente, en 25 años, el consumo de energía eléctrica se duplica, por término medio, cada 10 años. Esto significa que cada vez es mayor el número de procesos vinculados con el consumo de energía en los cuales se pasa a utilizar energía eléctrica.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Tanto en las grandes centrales como en las pequeñas, la energía eléctrica se produce fundamentalmente por medio de generadores electromecánicos de inducción. Hay

[1] Naturalmente que con esto la energía no desaparece. La tarea de la energética consiste únicamente en obtener energía en la forma más fácil de utilizar. Durante el proceso de consumo, la energía, en fin de cuentas, se transforma principalmente en energía interna.



Grupo energético de 1 millon 200 mil kW de la central electrica regional de Kostroma

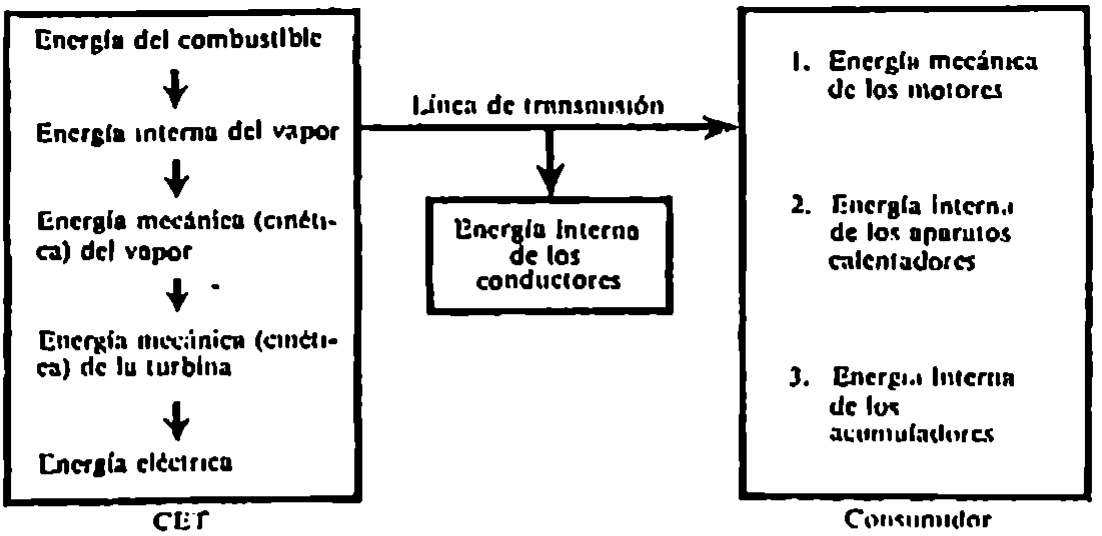


Fig. 55

dos tipos principales de centrales eléctricas, *térmicas e hidráulicas*. Estas centrales se diferencian por el tipo de los motores que accionan los rotores de los generadores.

En las CENTRALES ELÉCTRICAS TÉRMICAS sirve de fuente de energía un combustible: carbón, gas, petróleo, mazut o esquistos combustibles. Los rotores de los generadores eléctricos giran impulsados por turbinas de vapor o de gas, o por motores de combustión interna. Las más económicas son las grandes centrales eléctricas térmicas de turbinas de vapor (abreviado CET) La mayoría de las CET de la URSS utilizan como combustible polvo de carbón. En la producción de 1 kW·h de energía eléctrica se gastan unos centenares de gramos de carbón. En la caldera de vapor más del 90% del calor que desprende el combustible se transmite al vapor. En la turbina la energía cinética del chorro de vapor se transfiere al rotor. El árbol de la turbina está unido rígidamente al del generador. Los turbogeneradores de vapor son muy rápidos el número de revoluciones del rotor es de varios millares por minuto.

Del curso de "Física 3" (Ed. MIR) se sabe que el rendimiento de los motores térmicos crece al aumentar la temperatura inicial del agente de transformación. Por eso se hace que el vapor que entra en la turbina tenga parámetros elevados: temperatura de hasta 550 °C y presión de hasta 25 MPa El rendimiento de las CET llega al 40%. Una gran parte de la energía se pierde junto con el vapor de escape. Las transformaciones de la energía se muestran en el esquema representado en la fig. 55

Las centrales eléctricas térmicas especiales llamadas *centrales termoeléctricas* (CTE) permiten aprovechar una parte importante de la energía del vapor de escape en las empresas industriales y en aplicaciones domésticas (calentamiento de agua para la calefacción, abastecimiento de agua caliente, etc.). Como resultado el rendimiento de la CTE alcanza un 60–70%. En la actualidad las CTE proporcionan cerca del 40% de toda la energía eléctrica de la URSS y suministran energía eléctrica y calor a más de 800 ciudades

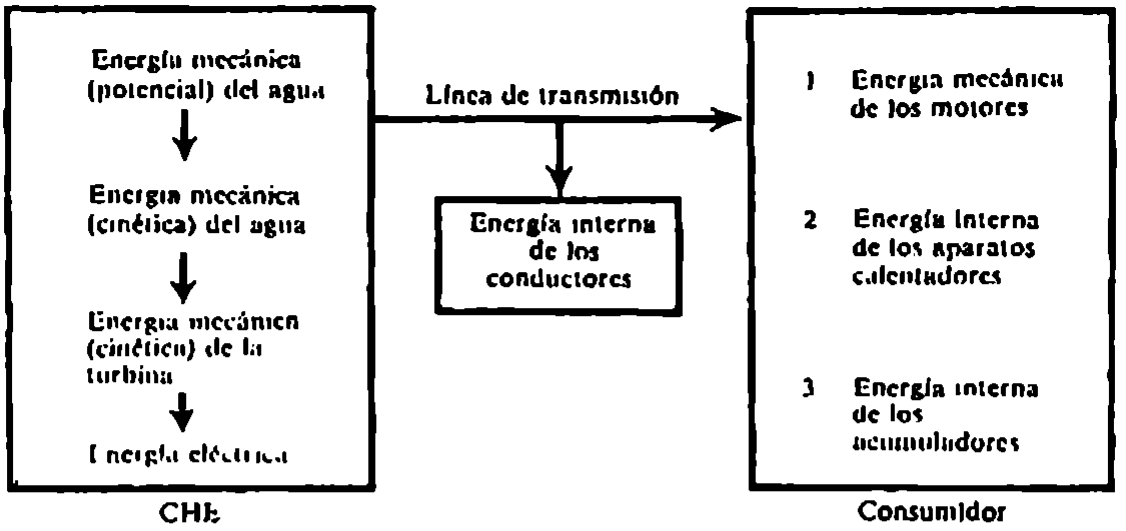


Fig. 56

En la rama de la termocentralización[1] la Unión Soviética ocupa un puesto rector en la energética mundial

En las CENTRALES ELÉCTRICAS HIDRÁULICAS O HIDROELÉCTRICAS (CHE) para hacer girar los rotores de los generadores se utiliza la energía potencial del agua. Los rotores de los generadores eléctricos son accionados por turbinas hidráulicas. La potencia de la central depende de la diferencia de nivel del agua (altura hidrostática) que crea la presa y de la masa de agua que pasa por la turbina cada segundo (caudal de agua). Las transformaciones de la energía se muestran en el esquema representado en la fig. 56.

Las centrales hidroeléctricas proporcionan cerca del 20% del total de la energía eléctrica que se produce en la URSS.

Cada vez es más importante el papel que empiezan a desempeñar las *centrales eléctricas atómicas* o *nucleares* (CEA). La primera CEA fue construida en la URSS en 1954.

UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. El principal consumidor de energía eléctrica en la URSS es la industria, a la cual corresponde cerca del 70% de la energía que se produce. Otro gran consumidor es el transporte. Cada vez es mayor la cantidad de líneas de ferrocarril que pasan a la tracción eléctrica. Casi todos los koljoses[2] y sovjoses[3] reciben energía eléctrica de las centrales eléctricas del Estado para cubrir sus necesidades de producción y domésticas. El empleo de la energía eléctrica en el alumbrado público y privado y en los aparatos electrodomésticos es de todos conocido.

Una gran parte de la energía eléctrica que hoy se utiliza se transforma en energía mecánica. Casi todos los mecanismos industriales están accionados por

---

[1] Este término, como traducción del ruso "теплофикация" es proposición mía, por no estar de acuerdo con el de "calefacción central" o "centralizada" que suele emplearse, pero que no refleja la idea exacta (*N. del T.*).

[2] Hacienda rural soviética colectivizada.

[3] Hacienda rural soviética nacionalizada.

motores eléctricos. Éstos son fáciles de manejar, compactos y dan la posibilidad de automatizar la producción

Cerca de la tercera parte de la energía eléctrica que consume la industria se utiliza con fines tecnológicos (soldadura eléctrica, calentamiento y fusión de metales, electrólisis, etc.).

3.4. Transmisión de la energía eléctrica

Consumidores de energía eléctrica existen en todas partes. Pero esta energía se produce en relativamente pocos sitios, próximos a los yacimientos de combustible y a los recursos hidráulicos. La energía eléctrica no se logra conservar en gran escala. Tiene que ser consumida inmediatamente después de obtenerse. Por eso se plantea la necesidad de transportarla a grandes distancias. Este transporte o transmisión origina pérdidas considerables Se debe esto a que la corriente eléctrica calienta los conductores de las líneas de transmisión de energía. De acuerdo con la ley de Joule - Lenz, la energía que se gasta en calentar los conductores de la línea se determina por la fórmula

$$Q = I^2Rt,$$

en la que R es la resistencia de la línea. Si la longitud de la línea es muy grande, el transporte de la energía puede no ser conveniente desde el punto de vista económico. La resistencia de la línea es prácticamente muy difícil de disminuir Por eso hay que reducir la intensidad de la corriente.

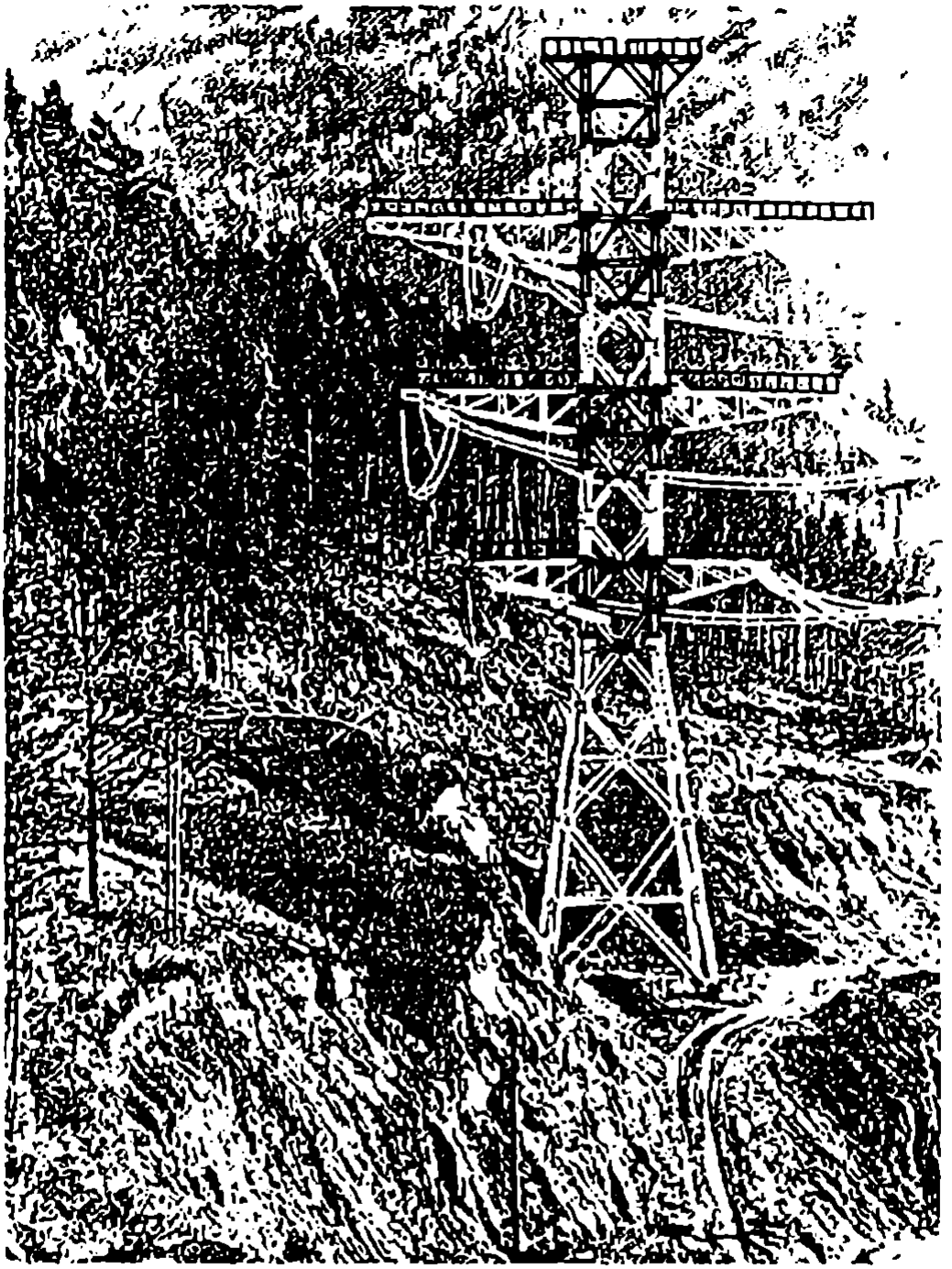
Como la potencia de la corriente es proporcional al producto de la intensidad de la corriente por la tensión, para conservar la potencia transmitida hay que elevar la tensión en la línea de transporte. Cuanto más larga sea dicha línea, tanto más conveniente será emplear una tensión más alta. Así, en la línea de alta tensión que conduce la energía *desde la CHE de Volgogrado (en el Volga) hasta Moscú*, se utiliza la tensión de 500 kV. Pero los generadores de corriente alterna se construyen para tensiones que no superan 16–20 kV. Tensiones mayores requerirían la adopción de complicadas medidas especiales para aislar los devanados y otras partes de los generadores

Por esta razón en las grandes centrales eléctricas se instalan transformadores elevadores El transformador eleva la tensión en la línea tantas veces como disminuye la intensidad de la corriente

Para la utilización directa de la energía eléctrica en los motores que accionan las máquinas herramientas, en la red del alumbrado y con otros fines, la tensión en los extremos de la línea tiene que reducirse Esto se consigue con los transformadores reductores.

De ordinario la disminución de la tensión y el aumento respectivo de la intensidad de la corriente se efectúa en varias etapas. En cada etapa se va haciendo menor la tensión y se va ampliando el territorio abarcado por la red eléctrica. El esquema de la transmisión y distribución de la energía eléctrica se da en la fig 57.

Cuando la tensión entre los conductores es muy elevada comienza a producirse la descarga por efecto corona, que origina pérdidas de energía La



Torre de la línea de transmisión de energía de la central hidroeléctrica Sayanskaya (sobre el río Yeniséi)

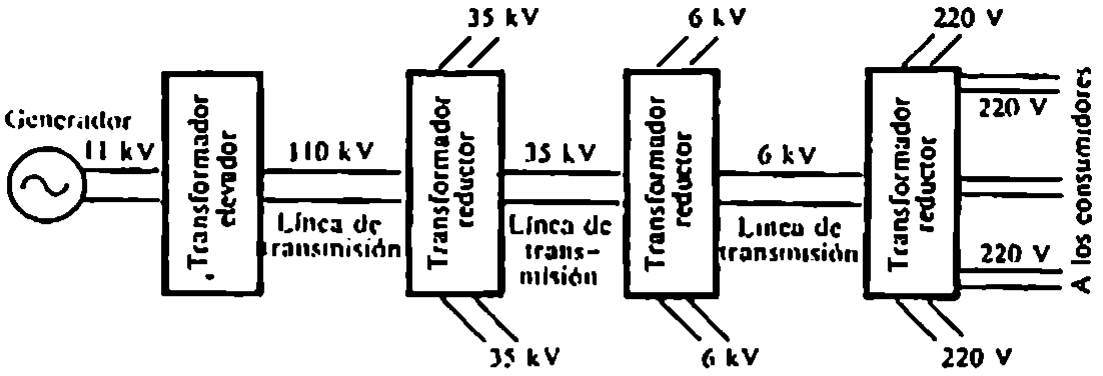


Fig. 57

amplitud permisible de la tensión alterna debe ser tal, que, para el área de la sección transversal del conductor dada, las pérdidas de energía debidas al efecto corona sean insignificantes.

Las centrales eléctricas de una serie de zonas de la Unión Soviética están unidas por líneas de transmisión de alta tensión, las llamadas líneas de transporte de energía, formando una red eléctrica común, a la cual se conectan los consumidores. Esta red común recibe el nombre de *sistema energético* y da la posibilidad de suavizar las cargas "de cresta" del consumo de energía durante las primeras horas de la mañana y de la tarde. El sistema energético asegura el suministro continuo de energía a los consumidores, independientemente del lugar de su emplazamiento. En la actualidad casi todo el territorio de la URSS está abastecido de energía por sistemas energéticos unificados. Ya funciona el sistema energético unificado de la parte europea de la Unión Soviética

3.5. Logros y perspectivas de la electrificación de la URSS

En 1920 fue aprobado el primer plan de desarrollo de la economía nacional basado en la electrificación, el plan GOELRO (Comisión Estatal para la Electrificación de Rusia). El promotor e inspirador de dicho plan fue V. I. Lenin, que concedía a la electrificación una importancia decisiva en la reconstrucción económica del país.

Según decía Lenin: "Sólo cuando el país esté electrificado, cuando la industria, la agricultura y el transporte se asienten sobre la base técnica de una gran industria moderna, sólo entonces venceremos definitivamente"[1]

El plan GOELRO, que preveía duplicar la producción industrial y cuadruplicar la producción de energía eléctrica en comparación con el año 1913, fue superado en todos sus índices en el plazo de 10 años que se había establecido. Incrementando el ritmo de la electrificación de año en año, la Unión Soviética ocupó en 1947 el primer puesto de Europa y el segundo del mundo de producción de energía eléctrica

[1] V. I. Lenin. *Obras escogidas en 12 tomos*. Tomo XI, pág. 311, Ed. Progreso, Moscú, 1977

Ahora, en un solo dia, la URSS produce, aproximadamente, 6 veces más energía que produjo en todo el año 1921, primer año de cumplimiento del plan GOELRO.

En la Unión Soviética se han construido centrales eléctricas hidráulicas, térmicas y atómicas de enorme potencia. La central hidroeléctrica más grande del país es la de Krasnoyarsk En ella se han instalado los grupos hidráulicos más potentes del mundo (de 500 mil kW cada uno); la potencia total de esta central es de 6 millones de kW.

En la URSS se encuentra en explotación un gran número de centrales eléctricas térmicas de más de 1 millón de kW cada una Muchas de ellas tienen más de 3 millones de kW de potencia, y la de Reftinski (en la provincia de Sverdlovsk), 3,8 millones de kW y, en la actualidad, es la central eléctrica térmica más grande de la Unión Soviética

Se ha previsto un desarrollo anticipado de la energética atómica en la parte europea de la URSS.

Unificando los sistemas energéticos de Siberia y Asia Central con el de la parte europea de país, se forma el sistema energético unificado de toda la URSS. Esto eleva la fiabilidad y capacidad de maniobra para el suministro de energía eléctrica al enorme territorio de la Unión Soviética. Para resolver este problema hay que construir líneas troncales de transporte de energía eléctrica a tensiones de 500 000, 750 000 y 1 150 000 V

¿ ?

1. ¿Qué ventajas tiene la corriente alterna frente a la corriente continua?
2. ¿En qué principio se basa el funcionamiento de los generadores de corriente alterna?
3. ¿A qué se llama relación de transformación?
4. ¿Cómo se efectúa la transmisión (el transporte) de la energía eléctrica a gran distancia?

Ejercicio 1

1. ¿Cómo deben colocarse las láminas de acero aisladas unas de otras del núcleo del rotor de un generador de inducción, para que las corrientes de Foucault sean menores?
2. Un cuadro (espira) rectangular de alambre gira en un campo magnético homogéneo. ¿En qué caso la f. e. m. inducida en dicho cuadro será máxima: cuando el plano del cuadro se encuentre en posición perpendicular a las líneas de inducción magnética o cuando esté en posición paralela a ellas?
3. Los arrollamientos de un transformador están hechos de alambres de distinto grosor. ¿Cuál de los arrollamientos tiene mayor número de espiras?
4. Idee un procedimiento para determinar el número de espiras del arrollamiento de un transformador sin desbobinarlo.
5. ¿Qué puede ocurrir si un transformador se conecta casualmente a una fuente de corriente continua?
6. Si en un arrollamiento de un transformador se cierra una espira, el transformador se estropea, ¿por qué?
7. Determinar el número de pares de polos que tiene el rotor de uno de los generadores de la CHE de Bratsk (en el río Angará), si la frecuencia con que gira dicho rotor es de 125 r p.m
8. Hallar las relaciones de transformación de todos los transformadores que deben utilizarse en la transmisión de energía eléctrica desde el generador hasta los consumidores, de acuerdo con el esquema que se da en la fig. 57 (Despreciar las pérdidas de energía.)

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 3

La corriente eléctrica se obtiene principalmente en los generadores electromecánicos de inducción (alternadores). Estos generadores transforman la energía mecánica en energía de la corriente eléctrica. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Valiéndose de dispositivos simples la energía eléctrica se puede transformar en cualquier otra forma de energía.

La corriente eléctrica alterna se transforma a un valor mayor o menor de la tensión por medio de los transformadores. El transformador consiste en dos arrollamientos montados en un núcleo de acero. Su objeto es aumentar o disminuir la tensión y la intensidad de la corriente con pérdidas mínimas de energía.

La variación de la tensión que se obtiene con un transformador viene dada por la relación del número de espiras n_1 del arrollamiento primario al número de espiras n_2 del arrollamiento secundario:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

La intensidad de la corriente disminuye (aumenta) tantas veces como veces aumenta (disminuye) la tensión.

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Las pérdidas de energía en los conductores son proporcionales al cuadrado de la intensidad de la corriente. La potencia que se transmite es, en cambio, proporcional al producto de la intensidad de la corriente por la tensión. Por eso, el transporte de energía eléctrica por cables es conveniente hacerlo a alta tensión y con poca intensidad de corriente. En las centrales eléctricas los transformadores elevan la tensión antes de transmitir la energía a grandes distancias. Al final de la línea de transporte se reduce la tensión por medio de otros transformadores y la corriente llega así a los consumidores.

La energía eléctrica se produce en centrales eléctricas térmicas, hidráulicas y atómicas (nucleares).

La cantidad de energía eléctrica producida es un índice importantísimo de la potencia económica de un país. La Unión Soviética ocupa el segundo puesto del mundo en producción de energía eléctrica.

4 ONDAS MECÁNICAS. SONIDO

4.1. Fenómenos ondulatorios

Todos hemos visto alguna vez que cuando se tira una piedra a la superficie tranquila de un estanque o un lago, desde el punto en que aquélla cae parten ondas en forma de anillos (fig. 58) Muchos habrán podido contemplar cómo las olas (ondas) del mar avanzan hacia la orilla. En las narraciones de viajes por mar suele hablarse de la monstruosa fuerza de las olas, que mecen como a cáscaras de nuez los buques mas grandes Pero al observar estos fenómenos no a todos se les ha ocurrido pensar que el sonido del chapoteo del agua llega a nuestro oído transportado por ondas del mismo aire que respiramos y que la luz, gracias a la cual podemos ver, también es un movimiento ondulatorio. Los procesos ondulatorios están extraordinariamente difundidos en la naturaleza. Las causas físicas que producen estos movimientos son diversas. Pero, lo mismo que las oscilaciones, todos los tipos de ondas se describen cuantitativamente por leyes iguales o casi iguales. Muchos problemas difíciles de comprender se hacen más inteligibles comparando entre sí distintos fenómenos ondulatorios.

Pero, ¿qué es una onda? ¿Por qué se originan las ondas?

Las partículas de todo cuerpo, sea sólido, líquido o gaseoso, interaccionan unas con otras. Por eso, si una partícula cualquiera del cuerpo empieza a oscilar, en virtud de la interacción entre las partículas, este movimiento comienza a propagarse con cierta velocidad en todos los sentidos

Se llama onda una oscilación que se propaga en el espacio con el correr del tiempo

En el aire, en los sólidos y dentro de los líquidos, las ondas mecánicas se originan en virtud de las fuerzas de elasticidad. Estas fuerzas efectúan la ligazón entre las distintas partes del cuerpo En la formación de las ondas en la superficie del agua participan las fuerzas de la gravedad y de la tensión superficial.

Donde las peculiaridades fundamentales del movimiento ondulatorio se pueden ver más claramente es en el ejemplo de las ondas en la superficie del agua. Las ondas se presentan como oleadas circulares que avanzan. Las distancias entre las crestas de las olas son aproximadamente iguales Pero si sobre el agua se deposita un objeto liviano, como, por ejemplo una caja de cerillas, éste no será arrastrado por la onda hacia delante, sino que empezará a oscilar verticalmente, permaneciendo casi exactamente en el mismo sitio.

Al propagarse la onda tiene lugar el desplazamiento de un estado determinado del medio que oscila, pero no un transporte de sustancia. La perturbación de la superficie del agua causada en un punto, por ejemplo por la caída de la piedra, se transmite a las zonas contiguas y poco a poco se propaga

Fig. 58

en todos los sentidos. Pero no aparece una corriente de agua: sólo se traslada la forma de la superficie

VELOCIDAD DE ONDA. Una de las carasteristicas mas importantes de una onda es su velocidad. Cualquiera que sea su naturaleza, las ondas no se propagan en el espacio instantáneamente. Su velocidad ES FINITA. Podemos figurarnos, por ejemplo, que sobre el mar vuela una gaviota de manera que todo el tiempo se encuentra encima de la cresta de una misma ola. La velocidad de la ola (onda) en este caso será igual a la velocidad de la gaviota. Las ondas de la superficie del agua son fáciles de observar porque su velocidad de propagación es pequeña.

ONDAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES No resulta difícil observar las ondas que se propagan a lo largo de un cordón de goma Si uno de los extremos de éste se fija y, después de estirar suavemente el cordón, se hace con la mano que el otro extremo oscile, por dicho cordón avanzará una onda (fig. 59). La velocidad de la onda será tanto mayor cuanto más tenso esté el cordón. La onda avanzará hasta el punto de sujeción de éste, se reflejará y retrocederá En este caso, al propagarse la onda, varía la forma del cordón Cada trozo de éste oscila respecto de su posición invariable de equilibrio. Preste atención al hecho de que cuando se propaga la onda a lo largo del cordón cada uno de los trozos de éste oscila en dirección PERPENDICULAR a la de propagación de la onda (fig. 60). Estas ondas se llaman *transversales*

Pero no toda onda es transversal. Las oscilaciones pueden originarse tambien *a lo largo* de la dirección en que se propaga la onda (fig 61). En este caso se dice que la onda es *longitudinal*. Este tipo de onda conviene observarlo en un muelle largo y suave de gran diámetro. Si con la palma de la mano se da un golpe a uno de los extremos del muelle (fig. 62, *a*), se verá como la

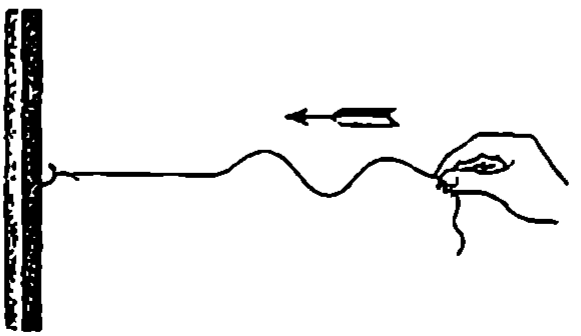


Fig. 59

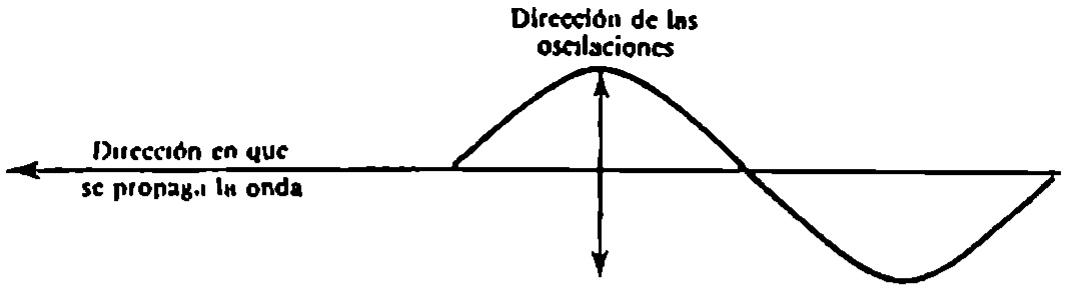


Fig. 60

Fig. 61

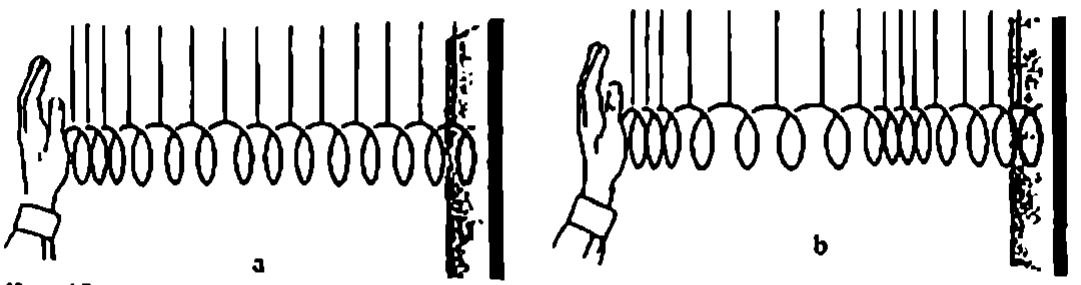


Fig. 62

compresión (impulso elástico) avanza por el muelle. Dando una serie de palmadas consecutivas se puede excitar en dicho muelle una onda, consistente en compresiones y extensiones sucesivas que avanzan una detrás de otra (fig. 62, *b*). Las oscilaciones de una espira cualquiera del muelle transcurren a lo largo de la dirección en que se propaga la onda. De las ondas mecánicas las que mayor importancia tienen son las sonoras. Pero el estudio de las ondas sonoras es más difícil que el de las ondas a lo largo de un cordón o de un muelle.

ENERGÍA DE UNA ONDA. Cuando se propaga una onda tiene lugar la transmisión del movimiento de una porción del cuerpo a otra. Con la transmisión del movimiento está relacionada la transmisión de energía[1]. La propiedad principal de todas las ondas, independientemente de su naturaleza, consiste en que transportan energía sin transportar sustancia. La energía procede de la fuente que excita las oscilaciones del extremo del cordón, de la cuerda, etc., y se propaga junto con la onda. Esta energía, por ejemplo, en el cordón se compone de la energía cinética del movimiento de las partes de éste y de la energía potencial de su deformación elástica. La disminución paulatina de la amplitud de las oscilaciones al propagarse la onda se debe a que una parte de la energía mecánica se transforma en interna.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Las ondas mecánicas se propagan por una sustancia: gas, líquido o sólido. Pero existe un tipo de ondas que no

[1] La idea de la propagación de la energía la introdujo, por primera vez en la física, el científico ruso N. A. ÚMOV (1846-1915).

necesita de sustancia alguna para propagarse Éstas son las ondas electromagnéticas, a las cuales pertenecen, en particular, las ondas radioeléctricas (hertzianas) y la luz. El campo electromagnético puede existir en el vacío, es decir, en un espacio que no contenga átomos. A pesar de que existen diferencias notorias entre las ondas electromagnéticas y las mecánicas, las primeras se comportan al propagarse de un modo semejante a las segundas. En particular, las ondas electromagnéticas tienen también velocidad finita y transportan consigo energía. Éstas son las propiedades más importantes de todo tipo de ondas.

4.2. Propagación de las ondas mecónicas

Pasemos ahora a estudiar más detalladamente el proceso de propagación de las ondas. Vamos a seguir el movimiento de partículas separadas de la sustancia durante el movimiento ondulatorio. Consideraremos primeramente una onda TRANSVERSAL que se propaga, por ejemplo, a lo largo de un cordón de goma.

Cada trocito del cordón posee masa y elasticidad. Cuando el cordón se deforma, en cualquiera de sus secciones aparecen fuerzas de elasticidad Estas fuerzas tienden a hacer volver el cordón a su posición inicial. En virtud de la inercia el trocito de cordón oscilante no se detiene en la posición de equilibrio, sino que pasa por ella y sigue moviéndose hasta que las fuerzas de elasticidad lo obligan a que se pare en el instante en que su elongación es máxima.

En vez de un cordón real, tomemos una serie de bolitas metálicas iguales suspendidas por hilos. Las bolitas están unidas entre sí por muellecitos (fig. 63). La masa de los muellecitos es mucho menor que la de las bolitas. En este modelo las propiedades inerciales (masa) y elásticas resultan separadas: la masa se concentra principalmente en las bolitas y la elasticidad, en los muellecitos Esta separación carece de importancia cuando se trata de estudiar el movimiento ondulatorio.

Si la bolita extrema izquierda se desvía en el plano horizontal, el muellecito se deforma y sobre la 2ª bolita empieza a actuar una fuerza que la obliga a desviarse hacia el mismo lado en que se desvió la 1ª Debido a la inercia, el movimiento de la 2ª bolita no se produce de acuerdo con el de la 1ª. Su movimiento, que repetirá el de la 1ª bolita, estará retrasado en el tiempo

Si la 1ª bolita se hace oscilar con un período T (simplemente con la mano o por medio de un mecanismo cualquiera), la 2ª bolita también empieza

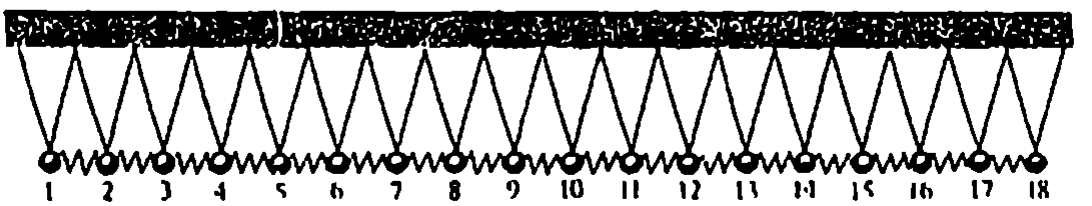


Fig. 63

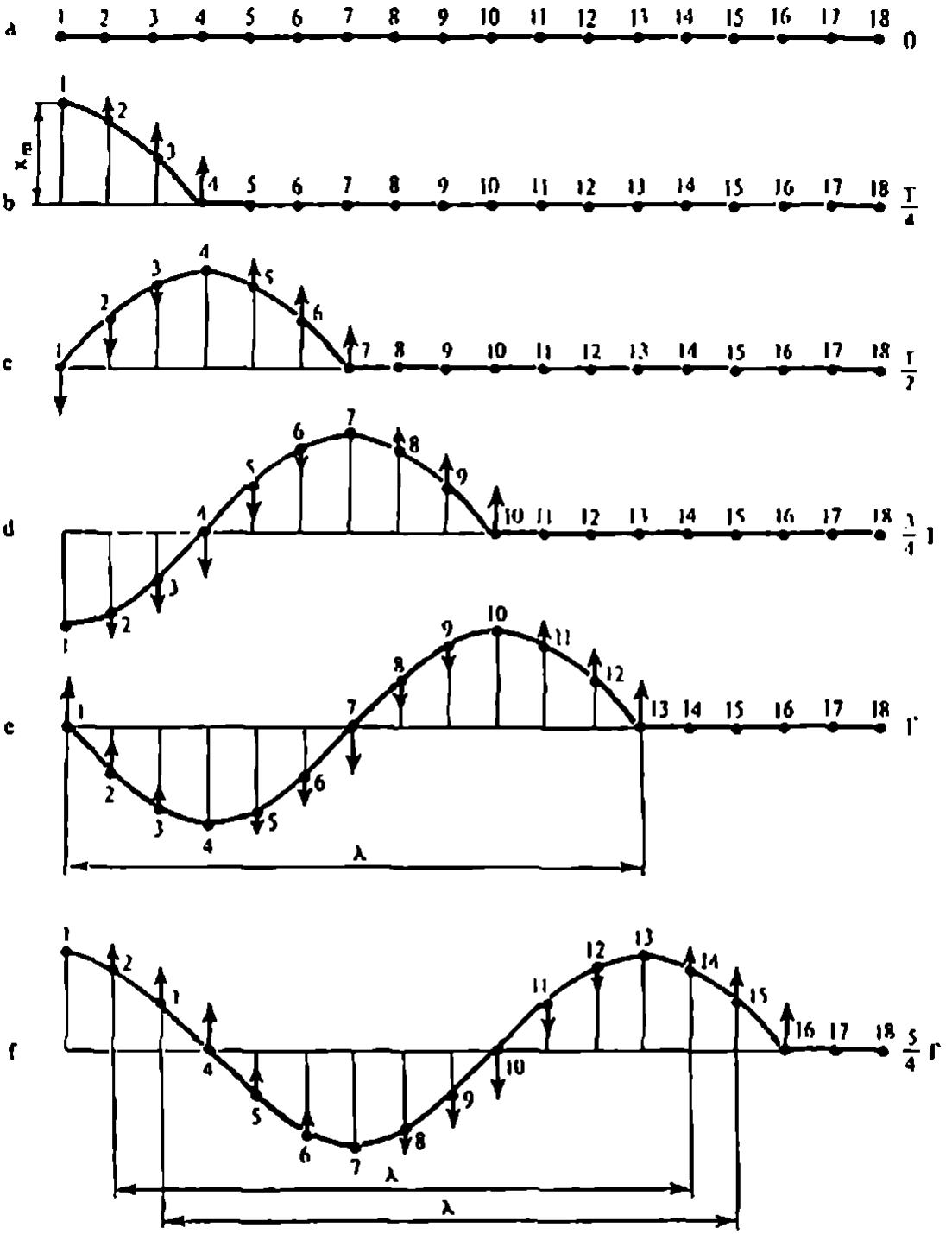


Fig. 64

a oscilar detrás de la primera, pero con cierto retraso de fase. La 3ª bolita, influida por la elasticidad producida por el movimiento de la 2ª, comienza a oscilar a su vez con un retraso de fase aún mayor, y así sucesivamente. Por fin, todas las bolitas realizan oscilaciones forzadas con una misma frecuencia, pero en fases distintas. Con esto, a lo largo de la fila de bolitas avanzará una onda transversal.

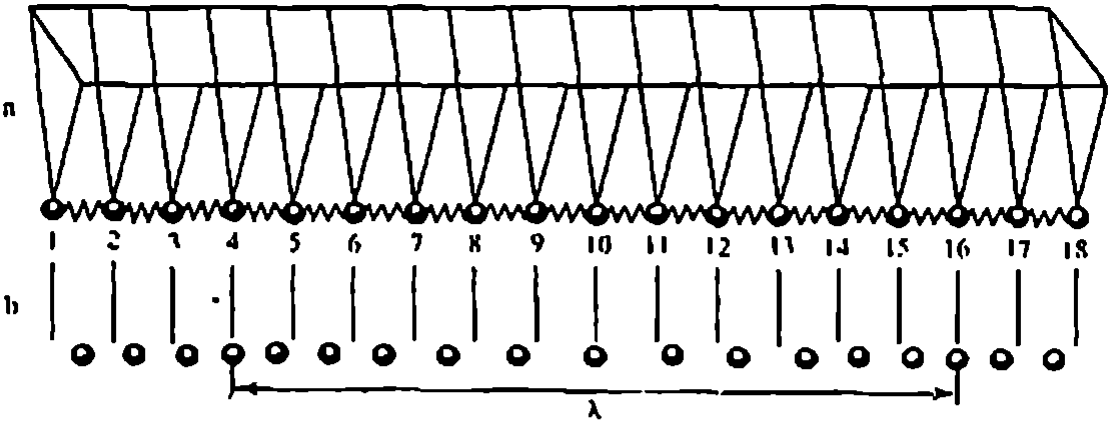


Fig. 65

La fig. 64,*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* representa el proceso de propagación de la onda. En ella se muestran las posiciones de las bolitas en instantes sucesivos separados entre sí por un cuarto de periodo (vista desde arriba). Las flechas aplicadas a las bolitas son los vectores velocidad de su movimiento en los respectivos instantes.

En el modelo de cuerpo elástico en forma de serie de bolitas con masa unidas entre sí por muellecitos (fig. 65,*a*) se puede observar el proceso de propagación de las ONDAS LONGITUDINALES. Las bolitas están suspendidas de tal modo que sólo pueden oscilar a lo largo de la fila. Si la 1ª bolita se hace oscilar con un periodo T, a lo largo de la fila avanzará una onda longitudinal formada por una sucesión de condensaciones y enrarecimientos de bolitas (fig. 65,*b*).

4.3. Longitud de onda. Velocidad de onda

Una vez que las oscilaciones, al propagarse la onda transversal, llegan a la 13ª bolita, las bolitas 1ª y 13ª oscilarán de manera idéntica. Cuando la 1ª se encuentre en la posición de equilibrio y se mueve hacia la izquierda (véase la fig. 64,*e*), la 13ª también se halla en la posición de equilibrio y se mueve hacia la izquierda. Al cabo de un cuarto de periodo la desviación (elongación) de la 1ª bolita hacia la izquierda será máxima y en la misma posición se encontrará la 13ª (véase la fig. 64,*f*). Las oscilaciones de estas bolitas se cumplen en la misma fase[1]. *La distancia entre los dos puntos más próximos entre sí que oscilan en la misma fase se llama longitud de onda.* Por consiguiente, las distancias entre las bolitas 1ª y 13ª, 2ª y 14ª, 3ª y 15ª son iguales a la longitud de onda (véase la fig. 64,*e* y *f*). La longitud de onda se designa por la letra griega λ (lambda).

La longitud de la onda longitudinal, de acuerdo con la fig. 65,*b*, es igual a la distancia entre las bolitas 2ª y 14ª o entre la 4ª y la 16ª.

---

[1] Más exactamente, las oscilaciones de la 13ª bolita tienen un retraso en fase, respecto de las oscilaciones de la 1ª, de 2π. Pero como $\cos(\omega t - 2\pi) = \cos \omega t$, esta diferencia de fase no implica diferencia en los estados de las bolitas oscilantes y puede decirse que éstas oscilan en la misma fase.

Durante la propagación de la onda, distintos puntos del cuerpo (bolitas en el modelo que consideramos) oscilan en fases diferentes siempre que la distancia entre ellos no sea igual a $n\lambda$ (siendo n un número entero)

Las bolitas 1ª y 7ª (véase la fig. 64), que se encuentran entre sí a la distancia $\lambda/2$, oscilan en oposición de fase cuando la 1ª se mueve hacia la izquierda, la 7ª lo hace hacia la derecha y viceversa

En un período la onda se propaga la distancia λ (vease la fig. 64 *e*). Por lo tanto su velocidad se define por la fórmula

$$v = \frac{\lambda}{T}. \tag{4.1}$$

Como el período T y la frecuencia ν están relacionados por la fórmula

$$T = \frac{1}{\nu},$$

resulta que

$$v = \lambda\nu \tag{4.2}$$

La velocidad de onda es igual al producto de la longitud de onda por la frecuencia de las oscilaciones.

En la propagación de la onda por el cordón se manifiesta una doble periodicidad.

EN PRIMER LUGAR, cada partícula del cordón efectúa oscilaciones periódicas en el tiempo. En el caso de las oscilaciones armónicas (estas oscilaciones se cumplen según la ley sinusoidal o cosinusoidal) la frecuencia y la amplitud de las oscilaciones son iguales en todos los puntos. Las oscilaciones sólo se diferencian por sus fases.

EN SEGUNDO LUGAR, en un instante dado la forma de la onda se repite en el espacio a lo largo del cordón con intervalos de longitud iguales a λ. En la fig. 66 se muestra el perfil de la onda en un instante determinado (línea negra). Con el tiempo toda esta figura se desplaza de izquierda a derecha con la velocidad v

Al cabo de un intervalo de tiempo Δt, la onda tendrá la forma representada en la misma figura con trazo azul

Para la onda longitudinal también es válida la fórmula (4.2), que relaciona la velocidad de propagación de la onda, la longitud de ésta y la frecuencia de las oscilaciones

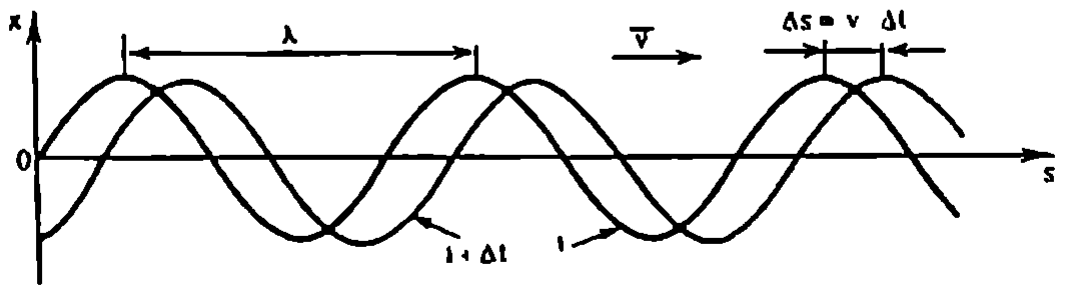


Fig. 66

¿ ?

1. ¿Qué es una onda?
2. ¿En qué difieren las ondas transversales y longitudinales? Ponga ejemplos de estos tipos de ondas.
3. ¿Cuáles son las peculiaridades fundamentales del movimiento ondulatorio?
4. ¿A qué se llama longitud de onda?
5. ¿Cómo está relacionada la velocidad de onda con la longitud de onda?
6. Determine ateniéndose a la fig. 64 la diferencia de fase entre dos bolitas oscilantes vecinas.

4.4. Ondas en un medio

En un cordón de goma, en una cuerda o en una varilla las ondas sólo pueden avanzar en una dirección, a lo largo de ellas. Pero si un gas, un líquido o un sólido llenan totalmente cierta región del espacio (medio continuo), las oscilaciones que se originan en un punto se propagan en todas las direcciones.

La onda, al propagarse desde cualquier fuente o foco en un medio continuo, abarca poco a poco una región del espacio cada vez mayor. Esto se ve bien en la fig. 58, en la cual se muestran las ondas circulares producidas en la superficie del agua por la caída de una piedra. La energía que llevan consigo las ondas desde la fuente, se distribuye con el tiempo en una región cada vez mayor del espacio. Por eso la energía transportada en un segundo a través de la unidad de superficie disminuye a medida que la onda se aleja del foco. Por consiguiente, también disminuye la amplitud de las oscilaciones a medida que se alejan de la fuente, ya que la energía del cuerpo oscilante es proporcional al cuadrado de la amplitud (véase el § 1.8). Esto es correcto no sólo para las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle o de un péndulo, sino para cualquier partícula de un medio.

Así, pues, la amplitud de la onda en un medio disminuye necesariamente a medida que se aleja de su fuente, incluso si la energía mecánica no se transforma en interna, a causa de la acción de las fuerzas de rozamiento en el medio.

Constituye una excepción la llamada *onda plana*. Esta onda se puede obtener si en un medio elástico se introduce una placa grande y se hace que oscile en dirección a la normal. Todos los puntos del medio próximos a la placa realizarán oscilaciones de la misma amplitud y en una misma fase. Estas oscilaciones se propagarán en forma de ondas en dirección de la normal a la placa, con la particularidad de que todas las partículas del medio que se hallen en un plano paralelo a la placa oscilarán en la misma fase. *Las superficies de igual fase se denominan superficies de onda.* En el caso de la onda plana las superficies de onda son planos (fig. 67). Una onda real sólo puede considerarse plana aproximadamente (porque en los bordes la superficie de onda se curva).

Toda recta normal a una superficie de onda se llama rayo. Se entiende por dirección de propagación de las ondas la dirección de los rayos. Los rayos de las ondas planas son rectas paralelas. A lo largo de los rayos se efectúa el transporte de energía.

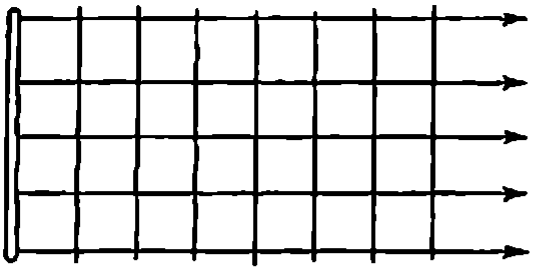


Fig. 67

Fig. 68

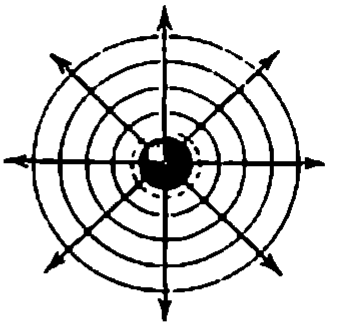


Fig. 69

Al propagarse la onda plana las dimensiones de las superficies de onda no varían (o casi no varían) a medida de alejarse de la placa. Por eso la energía de la onda no se dispersa en el espacio y la amplitud de las oscilaciones sólo disminuye a causa de la acción de las fuerzas de rozamiento.

En la superficie del agua es fácil obtener ONDAS LINEALES, que dan una imagen comprensible de las ondas planas en el espacio. Para esto hay que hacer que una varilla toque ligeramente la superficie del agua y oscile en dirección perpendicular a dicha superficie. Todas las partículas del agua que se encuentren en una recta paralela a la varilla oscilarán en una misma fase (fig. 68).

Otro ejemplo de onda en un medio continuo es la *onda esférica*. Esta onda se origina si en el medio se introduce una esfera pulsante (fig. 69) En este caso las superficies de onda son esferas. Los rayos están dirigidos a lo largo de las prolongaciones de los radios de la esfera pulsante.

La amplitud de las oscilaciones de las partículas en el caso de la onda esférica disminuye necesariamente a medida que ésta se aleja del foco La energía emitida por este último se distribuye, en este caso, uniformemente por la superficie de la esfera, cuyo radio va creciendo continuamente a medida que se propaga la onda.

Como se sabe, las ondas pueden ser transversales y longitudinales En la onda transversal el desplazamiento de las distintas partes del medio se realiza en dirección perpendicular a la de propagación de la onda Con esto se origina una deformación elástica llamada deformación de esfuerzo cortante o de cizallamiento. Unas capas de la sustancia se desplazan respecto de otras. El volumen del cuerpo no varía. Durante la deformación de cizallamiento se originan en el sólido fuerzas elásticas que tienden a hacer volver el cuerpo a su estado inicial. Estas fuerzas son precisamente las que provocan las oscilaciones de las partículas del medio.

El deslizamiento de unas capas respecto de otras en los gases y en los líqui-

dos no hace que aparezcan fuerzas de elasticidad. Por eso en los gases y en los líquidos no pueden existir ondas transversales. Las ondas transversales sólo se producen en los sólidos[1].

En la onda longitudinal tiene lugar la deformación por compresión (véase el § 4.1). Las fuerzas de elasticidad, ligadas a esta deformación, se originan tanto en los sólidos, como en los líquidos y en los gases. Estas fuerzas producen las oscilaciones de las distintas partes del medio. Por eso las ondas longitudinales se pueden propagar en todos los medios.

En los sólidos la velocidad de las ondas longitudinales es mayor que la velocidad de las ondas transversales. Esta circunstancia se aprovecha para determinar la distancia desde el epicentro de un terremoto hasta el observatorio sísmico. En éste se registra primero la onda longitudinal, ya que su velocidad en la corteza terrestre es mayor que la de la transversal. Al cabo de cierto tiempo se registra la onda transversal, excitada al producirse el terremoto al mismo tiempo que la longitudinal. Conociendo la velocidad de las ondas longitudinales y transversales en la corteza terrestre y el tiempo en que se retrasa la onda transversal, se puede hallar la distancia hasta el epicentro del terremoto.

4.5. Ondas sonoras

EXCITACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS. Las ondas en la superficie del agua o a lo largo de un cordón de goma se pueden ver directamente. En un medio transparente, como el aire o el agua, las ondas no se ven. Pero en determinadas condiciones se pueden oír. Si una regla de hierro larga se sujeta en un tornillo de mordazas o se aprieta al borde de una mesa y su extremo libre se desvía de la posición de equilibrio, excitamos en ella oscilaciones (fig. 70, *a*). Pero estas oscilaciones no serán percibidas por nuestro oído. No obstante, si acortamos la parte saliente de la regla (fig. 70, *b*), notaremos que esta empezará a sonar.

La regla comprime la capa de aire que está en contacto con ella por una parte y, al mismo tiempo, crea cierto enrarecimiento en la otra parte. Estas compresiones y enrarecimientos se suceden con el tiempo y se propagan en ambos sentidos en forma de una onda elástica longitudinal. Ésta llega a nuestro oído y provoca cerca de él oscilaciones periódicas de la presión, las cuales actúan sobre el aparato auditivo.

El oído humano percibe en forma de sonido las oscilaciones cuya frecuencia se encuentra entre los límites de 17 a 20 000 Hz. Estas oscilaciones se llaman *acústicas. La acústica es la ciencia que estudia el sonido.* Cuanto más corta sea la parte saliente de la regla, tanto mayor será la frecuencia de las oscilaciones. Por eso empezamos a oír el sonido cuando el extremo de la regla se hace suficientemente corto.

Todo cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) que oscile con frecuencia sonora crea en el medio circundante una onda sonora.

---

[1] Ondas transversales se originan también en la superficie de los líquidos, pero no dentro de ellos.

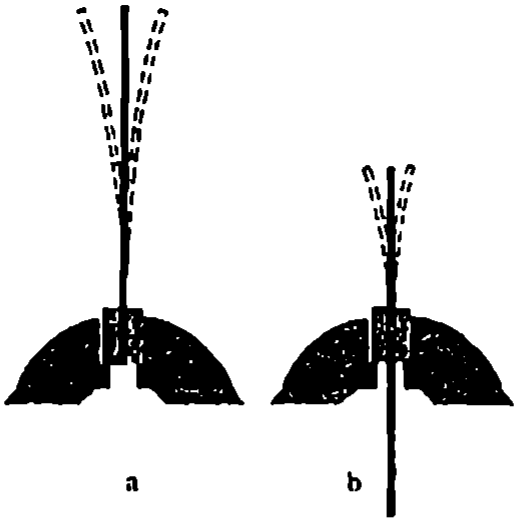


Fig. 70 a b

ONDAS SONORAS EN DISTINTOS MEDIOS Lo más frecuente es que las ondas sonoras lleguen a nuestro oído por el aire. Es poco corriente que nos encontremos totalmente sumergidos en el agua. Pero está claro que el aire no posee privilegio alguno respecto a otros medios, en el sentido de la posibilidad de propagación en él de las ondas sonoras. Si uno se tira de cabeza al agua cuando se está bañando, podrá escuchar el sonido que produce el choque de dos piedras dentro del agua a una distancia grande (fig. 71).

La tierra conduce bien el sonido El conocido historiador ruso N M KARAMZIN escribe cómo Dmitri DONSKOI, antes de la batalla del campo de Kulikovo (1380), aplicó su oído al suelo y oyó el trote de la caballería tártara, antes de que ésta pudiera verse

Si se aplica de lleno al oído el extremo de una larga regla de madera y se golpea ligeramente con la mano el otro extremo, el sonido se oye claramente. Pero si la regla se retira un poco del oído, se notará que el sonido casi deja de ser perceptible.

En el vacío no se pueden propagar las ondas sonoras. Para demostrar esto se puede colocar un timbre eléctrico debajo de la campana de una máquina

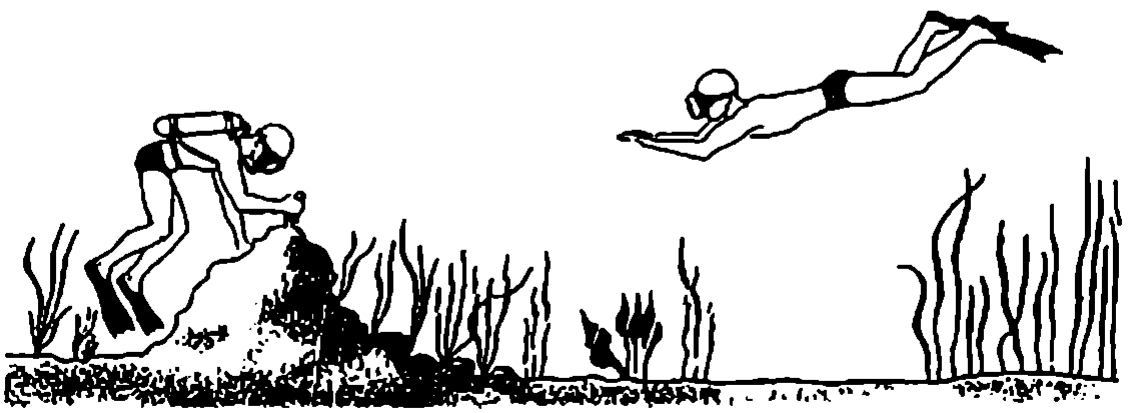


Fig. 71

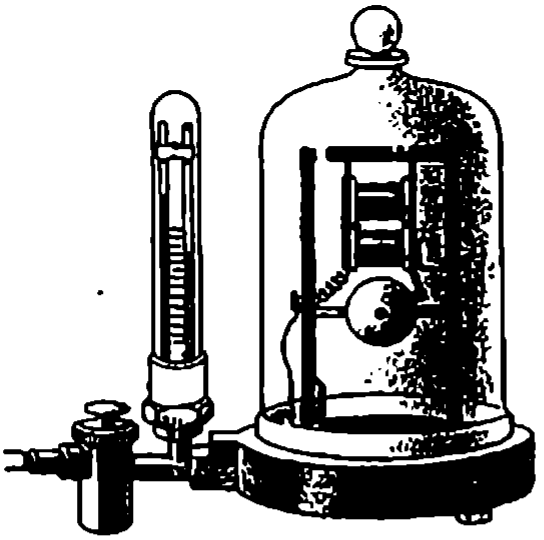


Fig. 72

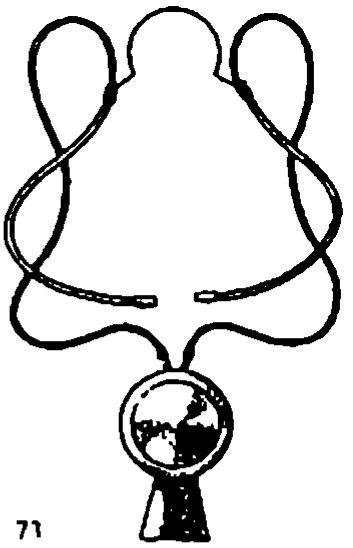


Fig. 73

neumática (fig. 72). A medida que la presión del aire debajo de la campana va disminuyendo, el sonido se debilita hasta que por fin deja de oírse.

Conducen mal el sonido los materiales como el fieltro, los tableros de material poroso, el corcho prensado y otros. Estos materiales se utilizan para aislamientos isonorizantes, es decir, para proteger locales contra la penetración en ellos de sonidos extraños.

IMPORTANCIA DEL SONIDO. Para poder orientarse con seguridad en el mundo, nuestro cerebro debe recibir información sobre lo que ocurre en el medio que nos rodea La vista y el oído desempeñan en esto el papel principal El tacto, el olfato y el gusto tienen menos importancia

Es natural que la cantidad mayor de información la recibimos por medio de la luz. La luz emitida por los focos (como el Sol, una lámpara, etc.) se refleja en los objetos que nos rodean e incidiendo en nuestros ojos permite hacernos una idea de su posición y movimiento. Muchos objetos son luminosos de por sí

Las ondas sonoras reflejadas en los objetos o las ondas emitidas por los objetos que suenan, también nos facilitan información sobre el mundo que nos rodea. Pero lo más importante es la palabra. Nosotros creamos y percibimos ondas sonoras y de este modo nos relacionamos unos con otros

Escuchando por medio de aparatos especiales, como, por ejemplo, el fonendoscopio médico (fig. 73), los sonidos del organismo, se pueden obtener datos importantes acerca del funcionamiento del corazón y de otros órganos internos.

VELOCIDAD DEL SONIDO Las ondas sonoras, lo mismo que todas las demás ondas, se propagan con velocidad finita Esto se puede poner de manifiesto como sigue La luz se propaga con una velocidad enorme (de 300 000 km/s) Por eso el relámpago de un disparo llega casi instantáneamente a nuestros ojos. Pero el sonido del mismo disparo nos llega con un retraso apreciable Lo mismo ocurre cuando se mira desde lejos un partido de fútbol Primero se ve la patada al balón, y sólo al cabo de cierto tiempo se oye el sonido del golpe. Posiblemente todos habrán observado que durante las tormentas el relámpago antecede siempre al trueno Si la tormenta está lejos, el retraso del

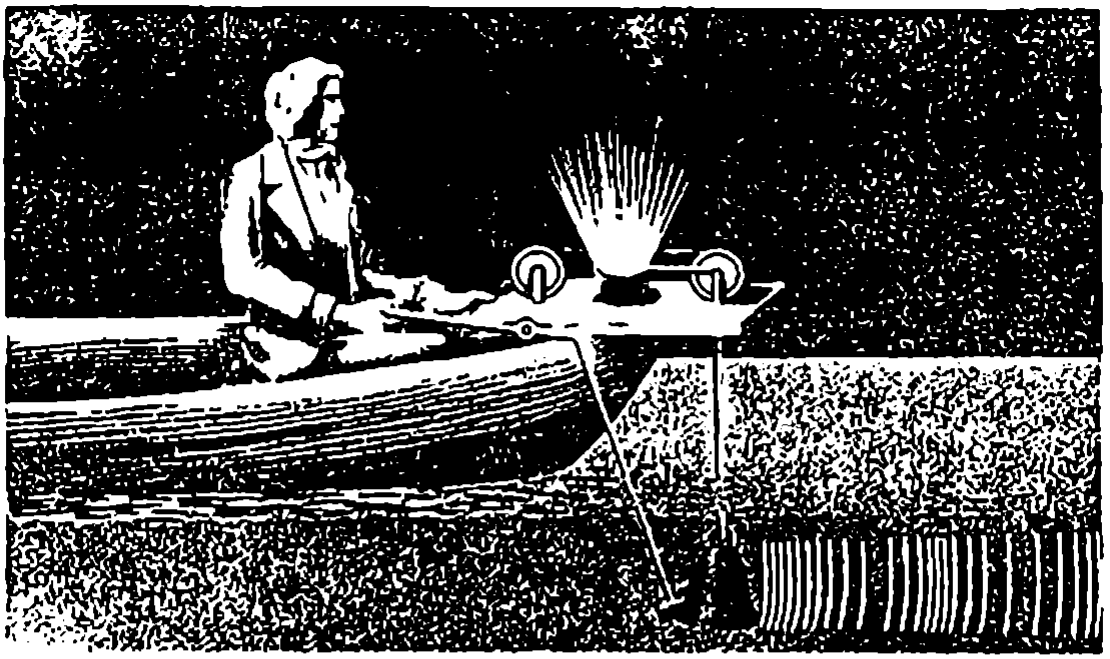


Fig. 74

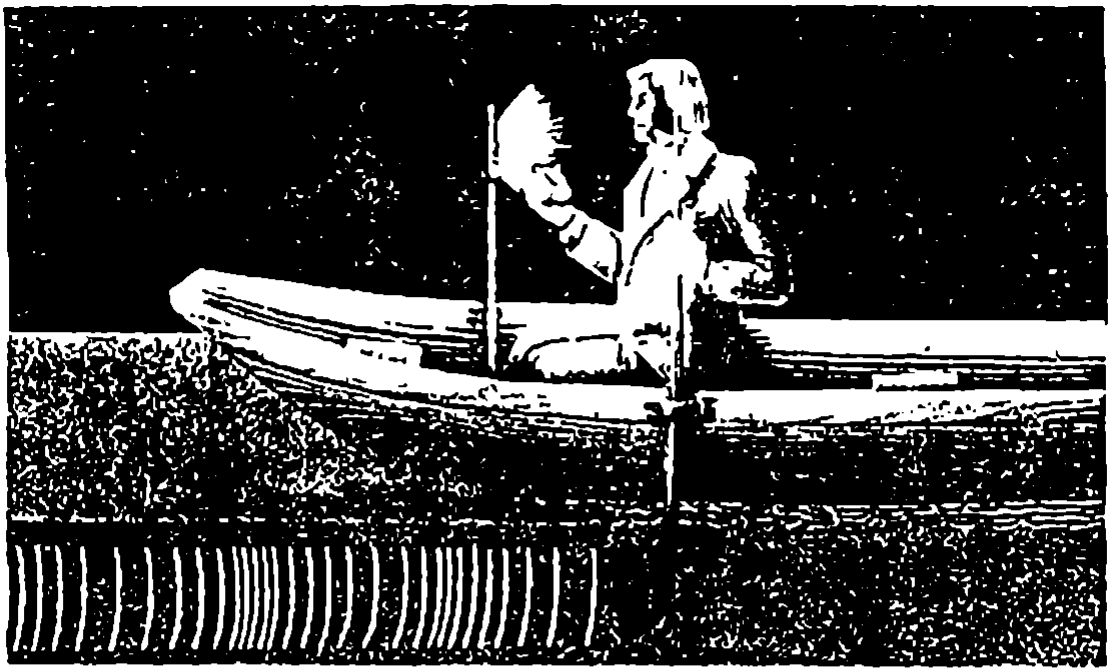
trueno llega a ser de varias decenas de segundos. Finalmente, debido a que la velocidad del sonido es finita, se produce el eco. El eco es la onda sonora reflejada en el lindero de un bosque, en una ribera escarpada, en un edificio, etc.

La velocidad del sonido en el aire a 0 °C es igual a 331 m/s. Esta velocidad es bastante grande. Sólo hace muy poco los aviones empezaron a volar a velocidades que superan la del sonido.

La velocidad del sonido en el aire no depende de la densidad de este. Esta velocidad es aproximadamente igual a la velocidad media del movimiento térmico de las moléculas y, lo mismo que ella, es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Cuanto mayor sea la masa de las moléculas del gas, tanto menor será la velocidad del sonido en él. Así, a 0 °C la velocidad del sonido en el hidrógeno es de 1270 m/s, y en el anhídrido carbónico, de 258 m/s.

En el agua la velocidad del sonido es mayor que en el aire. Dicha velocidad fue medida por primera vez en 1827 en el lago de Ginebra, en Suiza. En una barca se inflamaba un poco de pólvora al mismo tiempo que debajo del agua se hacía sonar una campana (fig. 74, *a*). Otra barca se hallaba a 14 km de distancia de la primera. El sonido se captaba por medio de una bocina sumergida en el agua (fig. 74, *b*). Ateniéndose a la diferencia del tiempo transcurrido, entre el destello de luz y la llegada de la señal acústica, se determinó la velocidad del sonido. A la temperatura de 8 °C la velocidad del sonido en el agua resultó ser de 1435 m/s.

En los sólidos la velocidad del sonido es aún mayor que en los líquidos. Por ejemplo, en el acero la velocidad del sonido a 15 °C es igual a 4980 m/s. El hecho de que la velocidad del sonido en un sólido es mayor que en el aire se puede comprobar como sigue. Haga que un colaborador suyo dé un golpe al extremo de un rail y aplique al otro extremo el oído, oirá dos golpes: el primero llegará a su oído por el rail, el segundo, por el aire.



Conociendo la frecuencia de las oscilaciones y la velocidad del sonido en el aire, se puede calcular la longitud de la onda sonora (véase el § 4.3). Las ondas más largas que percibe el oído tienen la longitud $\lambda \approx 17$ m y las más cortas la longitud $\lambda \approx 17$ mm.

4.6. Sonidos musicales y ruidos. Intensidad y altura de un sonido

Los sonidos que escuchamos a diario son muy diversos. Cualquier persona distingue los llamados *sonidos musicales* de los ruidos. A los primeros pertenecen el canto, el sonido de las cuerdas tensas de los instrumentos musicales, el silbo, etc. Los ruidos los producen las explosiones, el funcionamiento de los motores de combustión interna, el silbido de la serpiente, el chirrido de las bisagras mal engrasadas de las puertas, etc. Valiéndonos de nuestros órganos articulatorios podemos reproducir un sonido más o menos armonioso y, naturalmente, un ruido.

SONIDOS MUSICALES. ¿En qué se diferencian, desde el punto de vista de la física, los sonidos musicales del ruido y por qué los primeros pueden ser tan diferentes entre sí?

Un sonido musical puro se puede obtener con un instrumento muy simple llamado *diapasón*.

El diapasón es una varilla metálica doblada en forma de U y sujeta por su parte central a un vástago o pie. En la fig. 75 se muestra un diapasón montado sobre una caja de madera abierta por un lado. Si una de las ramas del diapasón se golpea con un martillito, se oye un sonido musical. Este sonido se va debilitando paulatinamente debido a que las oscilaciones de las ramas se amortiguan. La onda sonora es excitada por las ramas vibrantes del diapasón.

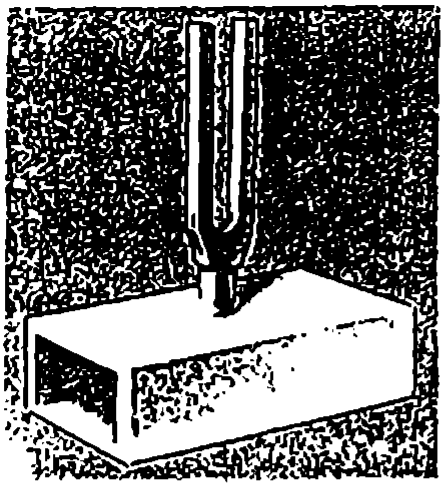


Fig. 75

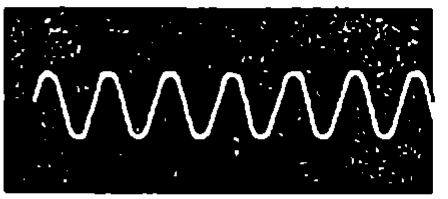


Fig. 76

El carácter de estas vibraciones puede determinarse sujetando a una de las ramas del diapasón una aguja y haciendo que ésta se deslice con velocidad constante por la superficie de una lámina de vidrio ahumada. Sobre la lámina la aguja traza una línea muy parecida a la sinusoide (fig. 76) Este *desarrollo con el tiempo* de las oscilaciones es semejante al que se obtiene por medio del péndulo provisto de embudo con arena. De esto se puede deducir que las oscilaciones (vibraciones) de las ramas del diapasón se aproximan mucho a las armónicas.

El sonido que emite un cuerpo oscilando armónicamente se llama tono musical o simplemente tono.

Los tonos musicales se distinguen de oído por su intensidad y altura ¿De qué magnitudes físicas dependen la intensidad y la altura del tono?

INTENSIDAD DEL SONIDO La intensidad del sonido está determinada por la amplitud de las oscilaciones. Cuanto más fuerte sea el golpe dado con el martillito al diapasón, tanto más intenso será el sonido emitido por éste Entre tanto un golpe más fuerte provoca oscilaciones de mayor amplitud. No cabe duda de que la intensidad de un sonido cualquiera también depende de la amplitud de las oscilaciones en la onda sonora.

No obstante, debe tenerse en cuenta que la sensibilidad de nuestro oído depende de la frecuencia del sonido. Oscilaciones sonoras de amplitudes iguales no nos parecen de la misma intensidad si sus frecuencias son distintas La sensibilidad máxima del oído humano corresponde a las oscilaciones cuya frecuencia es, aproximadamente, de 3500 Hz

ALTURA DEL SONIDO. Para definir a que se debe cierta *altura del sonido* hay que disponer de varios diapasones de dimensiones distintas. Haciendo deslizarse a lo largo de una placa ahumada la aguja sujeta a una de las ramas del diapasón que suena, se puede notar que cuanto más alto sea el sonido que emite el diapasón, tanto menor será el período de la sinusoide que traza en la placa y, por consiguiente, tanto mayor la frecuencia de las oscilaciones del diapasón. La altura del sonido se debe a la frecuencia de las oscilaciones

Lo mismo puede observarse cuando oscila una cuerda. El aumento de la tensión de la cuerda hace que crezca la frecuencia de las oscilaciones libres. Por eso, tensando las cuerdas de una guitarra con las clavijas, hacemos que el sonido sea más alto.

A la gama de la voz humana corresponde el intervalo de frecuencias de 70 a 10000 ó 12000 Hz.

¿QUE ES EL RUIDO? El ruido se diferencia del tono musical en que a él no le corresponde una frecuencia bien determinada de las oscilaciones y, por lo tanto, una determinada altura del sonido. En el ruido están presentes oscilaciones de todas las frecuencias posibles

4.7. Resonancia acústica

Un cuerpo que suena puede efectuar tanto oscilaciones libres como oscilaciones forzadas, bajo la acción de una fuerza periódica exterior Cuando la frecuencia de la fuerza exterior coincide con la frecuencia propia de las oscilaciones, empieza la resonancia

Para observar la *resonancia acústica* lo mas fácil es valerse de dos diapasones iguales. Dispongamos estos diapasones a poca distancia entre si de manera que los lados abiertos de sus cajas estén uno frente a otro (fig 77) Si

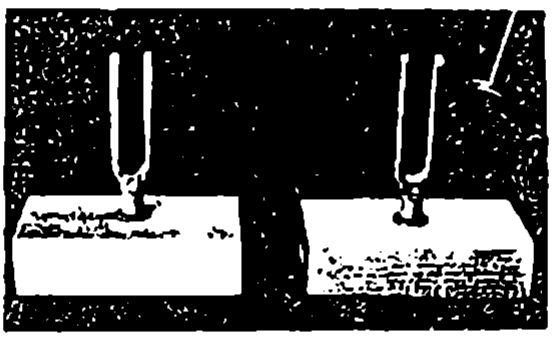


Fig. 77

con el martillito damos un golpe a una de las ramas de un diapasón y luego atenuamos las vibraciones con la mano, observaremos que el otro diapasón empieza a sonar La onda sonora del primer diapasón crea una fuerza periódica que actúa sobre el segundo diapasón. Las frecuencias propias de ambos diapasones son iguales y la amplitud de las oscilaciones del segundo resulta ser grande. Si se toman diapasones con frecuencias propias diferentes, cuando se excite el primero el segundo prácticamente no sonará En el caso de los diapasones iguales bastará sujetar a una de las ramas de uno de ellos una abrazadera liviana para que la resonancia ya no se produzca

El amortiguamiento de un diapasón es pequeño, por lo que la curva de resonancia es muy aguda (véase el § 1.9).

4.8. Ultrasanido

Cuando las frecuencias son menores que 17 o mayores que 20000 Hz las oscilaciones de la presión ya no son percibidas por el oído humano Las ondas longitudinales con frecuencia de oscilación inferior a 17 Hz reciben el nombre de *infrasonido* El infrasonido, hasta ahora, se utiliza poco en la técnica.

Las ondas longitudinales con frecuencia superior a 20000 Hz se llaman *ultrasonido*. El ultrasonido se emplea en la técnica y desempeña un gran papel en la vida de los animales. Los murciélagos, los delfines y algunos insectos emiten y captan el ultrasonido.

Para obtener ultrasonido de gran intensidad se emplean vibradores especiales cuyo funcionamiento se basa en que ciertos cristales (cuarzo, sal de la Rochela, turmalina) tienen la propiedad de que sus dimensiones varían si se someten a la acción de un campo eléctrico. En dependencia de la dirección del campo los cristales se comprimen o se alargan.

Una lámina de cuarzo situada dentro de un condensador plano, al cual se aplica tensión alterna, realiza oscilaciones forzadas. Todo cuerpo elástico, incluido el cuarzo, posee frecuencias propias. Cuando la frecuencia del campo eléctrico alterno coincide con la frecuencia propia de la lámina de cuarzo, empieza la resonancia y la amplitud de las oscilaciones aumenta mucho. Esta lámina, sumergida en el agua, puede emitir ondas de hasta varios kilovatios de potencia por cada centímetro de superficie. Tiene importancia que, por medio de las ondas cortas, se pueden crear estrechos haces dirigidos, cuyo ensanchamiento a medida que se propagan es insignificante.

Una onda ultrasonora potente es capaz de triturar cuerpos colocados en un líquido (los trocitos de metal se transforman en fina suspensión). El ultrasonido ejerce una enérgica acción biológica. Los microbios perecen en el campo del ultrasonido. Por medio del ultrasonido se puede esterilizar la leche y otros productos.

En los líquidos las ondas ultrasonoras se amortiguan mas débilmente que en el aire. Por eso el ultrasonido se aplica en la *hidroacústica*. El aparato más importante es la *sonda de eco, hidrolocalizador* o *sonar*. Emitiendo impulsos cortos de ondas ultrasonoras se puede captar su reflexión en el fondo del mar o en otros objetos. Por el retraso de la señal reflejada se puede determinar la

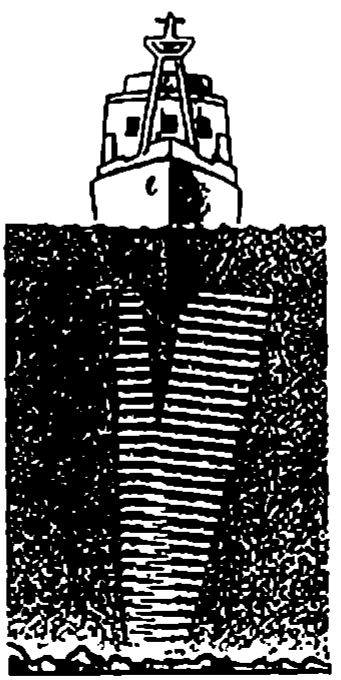


Fig. 78

distancia a que se encuentra el obstáculo. Así se mide la profundidad del mar (fig. 78) y se descubren los bancos de peces, los icebergs o los submarinos.

Por la reflexión del ultrasonido en los rechupes o las grietas de las piezas metálicas de fundición se pueden descubrir los defectos que éstas tienen

En medicina se utiliza mucho el ultrasonido para la diagnosis y con fines curativos (soldadura de huesos fracturados, curación de articulaciones y de procesos inflamatorios).

Los delfines y los murciélagos tienen localizadores ultrasonicos extraordinariamente perfectos Los primeros se orientan con seguridad en el agua turbia, emitiendo ultrasonidos y captando su reflexion en los objetos o presas.

Los murciélagos pueden volar sin dificultad en una habitación totalmente oscura, en la cual se hayan tendido multitud de cuerdas en todas las direcciones posibles. Sus oidos sustituyen eficazmente a los ojos. El murciélago emite impulsos de oscilaciones ultrasónicas Las frecuencias de estas oscilaciones en el impulso es de 25000 a 50000 Hz. La duración de cada impulso no supera 0,015 s.

¿?

1 ¿Que onda se llama plana y cuál esférica?
2 ¿Por qué no existen ondas transversales en los gases y en los liquidos?
3 ¿Qué oscilaciones llevan el nombre de acusticas?
4 ¿De qué depende la velocidad del sonido en el aire?
5 ¿Qué es lo que define la intensidad y la altura del sonido?

4.9. Interferencia de ondas

COMPOSICIÓN DE LAS ONDAS. Hasta ahora sólo hemos tomado en consideración una onda que se propaga desde una fuente o foco Sin embargo, muy a menudo en un mismo medio se propagan simultáneamente varias ondas. Por ejemplo, cuando en una habitación hablan varias personas, las distintas ondas sonoras se superponen unas a otras. ¿Qué ocurre con esto?

Este fenómeno es mas facil de estudiar observando las ondas sobre la superficie del agua. Si lanzamos dos piedrecitas al agua, creando así dos ondas anulares, es fácil ver que cada onda pasa a través de la otra y se comporta después como si esta segunda onda no existiera en absoluto De esta misma manera un número cualquiera de ondas sonoras puede simultáneamente propagarse en el aire sin estorbarse lo más mínimo unas a otras El conjunto de instrumentos musicales de una orquesta o de voces de un coro crea ondas sonoras que nuestro oído percibe al mismo tiempo, pudiendo distinguir un sonido de otro.

Veamos ahora más atentamente lo que ocurre en los puntos en que las ondas se superponen una a otra Observando las ondas que sobre la superficie del agua producen las dos piedrecitas lanzadas, nos cerciorarenos de que ciertas regiones de la superficie no se han perturbado, pero en otras la perturbación ha aumentado

Si en un punto se encuentran las crestas de dos ondas, en este punto la perturbación del agua se refuerza

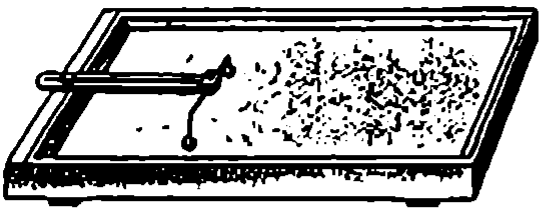


Fig. 79

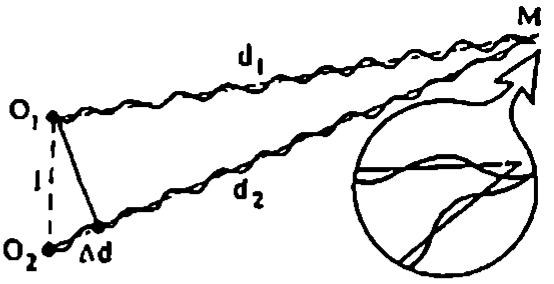


Fig. 80

Si, por el contrario, la cresta de una onda se encuentra con el valle o depresión de otra, en la superficie del agua no habrá perturbación.

En general, en cada punto del medio las oscilaciones provocadas por dos ondas simplemente se suman. La elongación resultante de cualquier partícula del medio será igual a la suma de las elongaciones que se producirían si cada una de las ondas se propagara en ausencia de la otra.

INTERFERENCIA *La composición en el espacio de dos o más ondas, en caso de la cual se origina una distribución, constante con el tiempo, de la amplitud de las oscilaciones resultantes en distintos puntos del espacio, se llama interferencia.*

Aclaremos en qué condiciones se produce la interferencia de ondas. Para esto consideremos más detalladamente la composición de las ondas sobre la superficie del agua.

En una cubeta con agua se pueden excitar al mismo tiempo dos ondas circulares por medio de dos bolitas sujetas a una varilla que realice oscilaciones armónicas (fig. 79). En un punto cualquiera M de la superficie del agua (fig. 80) se compondrán las oscilaciones generadas por las dos ondas (procedentes de los focos O_1 y O_2). Las amplitudes de las oscilaciones producidas en el punto M por ambas ondas, en general, se diferenciarán, ya que dichas ondas recorren caminos distintos d_1 y d_2. Pero si la distancia l entre los focos es mucho menor que la longitud de estos caminos ($l \ll d_1$ y $l \ll d_2$), ambas amplitudes se pueden considerar prácticamente iguales.

El resultado de la composición de las ondas que llegan al punto M dependerá de la diferencia de fase entre ellas. Como recorren distancias distintas, d_1 y d_2, las ondas tienen una diferencia de marcha (o recorrido) $\Delta d = d_2 - d_1$. Si esta diferencia es igual a la longitud de onda λ, la segunda onda se retrasará, respecto de la primera, exactamente en un período (porque precisamente en un período la onda recorre un camino igual a la longitud de onda). Por consiguiente, en este caso tanto las crestas como los valles de ambas ondas coincidirán.

CONDICIÓN DE LOS MÁXIMOS. La fig. 81 representa la gráfica de las elongaciones x_1 y x_2 originadas por las dos ondas cuando $\Delta d = \lambda$, en función del tiempo. La diferencia de fase de las oscilaciones es nula (o, lo que es lo mismo, 2π, ya que el período del seno es igual a 2π). La composición de estas dos oscilaciones da una oscilación resultante de amplitud dos veces mayor. Las oscilaciones de la elongación resultante x se representan en la fig. 81 con línea azul. Lo mismo ocurrirá si en el trozo Δd caben no una, sino un número entero cualquiera de longitudes de onda.

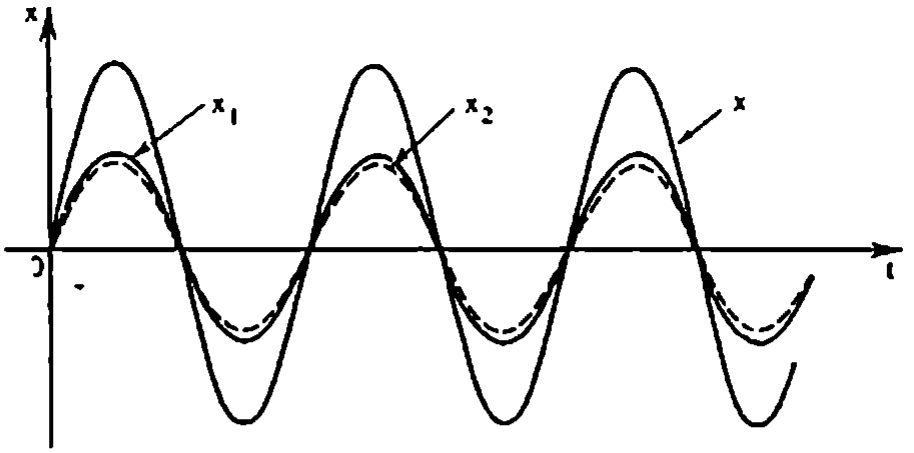


Fig. 81

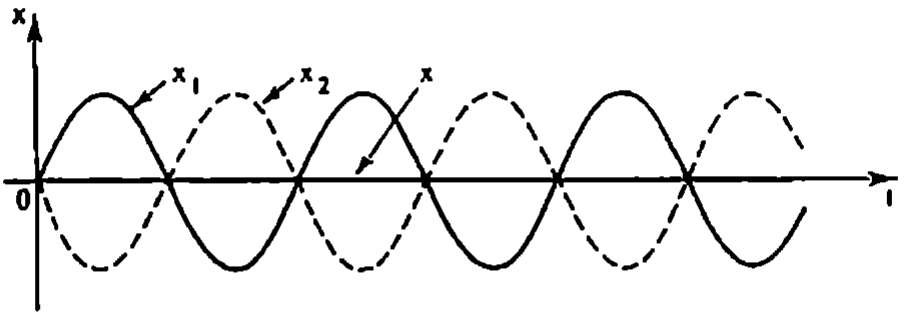


Fig. 82

La amplitud de las oscilaciones del medio en un punto dado será máxima si la diferencia de marcha de dos ondas, que excitan las oscilaciones en dicho punto, es igual a un número entero de longitudes de onda[1]:

$$\Delta d = k\lambda, \tag{4.3}$$

siendo $k = 0, 1, 2, \ldots$

CONDICIÓN DE LOS MÍNIMOS Veamos ahora lo que ocurre cuando en el segmento Δd cabe media longitud de onda. Es evidente que la segunda onda se retrasará de la primera medio periodo. La diferencia de fase resulta ser igual a π, es decir, las oscilaciones se generarán en oposición de fase. Como resultado de la composición de estas oscilaciones la amplitud de la oscilación resultante será nula, o sea, en el punto considerado no se producirán oscilaciones (fig. 82). Lo mismo sucede si en el segmento Δd cabe un número impar cualquiera de semilongitudes de onda.

La amplitud de las oscilaciones del medio en un punto dado será mínima si la diferencia de marcha de dos ondas, que excitan dichas oscilaciones en este punto, es igual a un número impar de semilongitudes de onda:

$$\Delta d = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \tag{4.4}$$

[1] Esto sólo es correcto si las fases de las oscilaciones de los dos focos coinciden

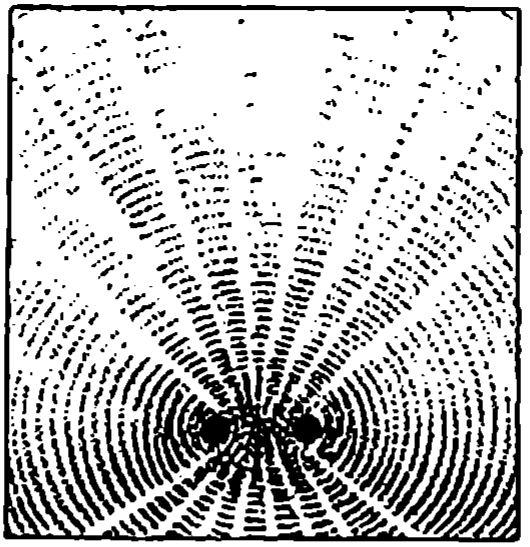


Fig. 81

Si la diferencia de marcha $d_2 - d_1$ toma un valor intermedio entre λ y $\lambda/2$, la amplitud de la oscilación resultante tomará también cierto valor intermedio entre el doble de la amplitud y cero. Pero lo más importante es que la amplitud de las oscilaciones en un punto cualquiera no varía con el tiempo. En la superficie del agua aparece una distribución determinada, invariable con el tiempo, de la amplitud de las oscilaciones, llamada *figura de interferencia* (fig. 83).

ONDAS COHERENTES. Para que se forme una figura de interferencia estable es necesario que los focos de las ondas tengan igual frecuencia y que las fases de sus oscilaciones coincidan o difieran en cierta magnitud constante (independiente del tiempo). En otras palabras, la DIFERENCIA DE FASE de las oscilaciones de ambos focos debe permanecer INVARIABLE. Los focos o fuentes que satisfacen estas condiciones se dice que son *coherentes*. Se da también el nombre de coherentes a las ondas creadas por ellos. Sólo cuando se componen ondas coherentes se origina una figura de interferencia estable.

En cambio, si la diferencia de fase de las oscilaciones de los focos no permanece constante, en un punto cualquiera del medio variará la diferencia de fase de las oscilaciones excitadas por las dos ondas. Por eso la amplitud de las oscilaciones resultantes variará en el transcurso del tiempo. Como resultado los máximos y los mínimos se trasladarán en el espacio y la figura de interferencia perderá nitidez.

La interferencia es un fenómeno propio de los procesos ondulatorios, cualquiera que sea su naturaleza. En particular, se puede observar la interferencia del sonido. La gran importancia de la interferencia consiste en que si al estudiar un proceso se pone de manifiesto la interferencia, esto sirve de demostración indiscutible de que se trata de un movimiento ondulatorio.

DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA DURANTE LA INTERFERENCIA. Las ondas transportan energía. ¿Qué ocurre con esta energía cuando las ondas se atenúan una a otra? ¿No será que se convierte en otra forma de la energía y que en los mínimos de la figura de interferencia se desprende calor? Nada de eso. La existencia del mínimo en un punto dado de la figura de interferencia significa que a dicho punto no llega energía alguna. A causa de

la interferencia se produce una redistribución de la energía en el espacio. La energía no se distribuye uniformemente por todas las partículas del medio, sino que se concentra en los máximos a costa de que a los mínimos no llega en absoluto.

4.10. Principio de Huygens. Ley de la reflexión de las ondas

Hasta ahora hemos dado a conocer las ondas que se propagan en un medio homogéneo. Ahora vamos a estudiar lo que ocurre con las ondas cuando se encuentran con un obstáculo, por ejemplo, con una pared sólida.

El principio general que describe el comportamiento de las ondas fue propuesto por el científico holandés, contemporáneo de Newton, Christian HUYGENS. Según el principio de Huygens todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se comporta como un foco de ondas secundarias. Para, conociendo la posición de la superficie de onda en un instante dado t, hallar su posición en el instante siguiente $t + \Delta t$ hay que considerar cada punto de la superficie de onda como una fuente de ondas secundarias. La superficie tangente a todas las ondas secundarias es la superficie de onda en el instante siguiente (fig. 84). Este principio es válido en igual medida para describir la propagación de cualesquiera ondas, sean sonoras, luminosas o de otro tipo.

Para las ondas mecánicas el principio de Huygens tiene una interpretación intuitiva: las partículas del medio, hasta las cuales llega una oscilación, oscilando a su vez, ponen en movimiento las partículas vecinas del medio con las cuales interaccionan.

Aplicando el principio de Huygens podemos hallar la ley a la cual se subordinan las ondas al reflejarse en la superficie de separación de dos medios.

Veamos cómo se refleja una onda plana. En la fig. 85 MN es la superficie reflectora y las rectas A_1A y B_1B, dos rayos de la onda plana incidente (paralelos entre sí). El plano AC es la superficie de dicha onda.

El ángulo α entre el rayo incidente y la perpendicular a la superficie reflectora en el punto de incidencia se llama *ángulo de incidencia*.

La superficie de onda reflejada se puede obtener trazando la envolvente de las ondas secundarias, cuyos centros se encuentran en el límite de separación de los medios. Al límite reflector distintas partes de la superficie de onda AC llegan

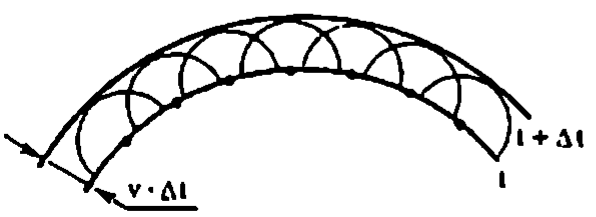


Fig. 84

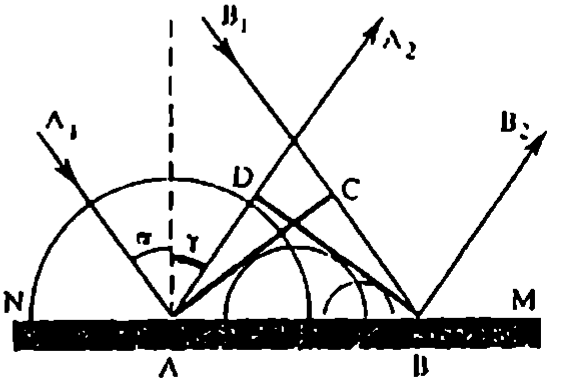


Fig. 85

Christian Huygens (1629–1695) eminente físico y matemático holandés, creador de la primera teoría ondulatoria de la luz. Los fundamentos de esta teoría los expuso en su "Tratado de la luz". Fue el primero en utilizar el péndulo para conseguir la marcha regular de los relojes y dedujo la fórmula del período de las oscilaciones de los péndulos simple y compuesto. Sus trabajos matemáticos conciernen a la investigación de las secciones cónicas, de la cicloide y de otras curvas. A él se debe uno de los primeros trabajos sobre teoría de las probabilidades (tratado "Sobre los cálculos en el juego de dados"). Con un telescopio perfeccionado por él, descubrió el satélite Titán de Saturno y determinó que el anillo de Saturno no toca la superficie del planeta.

no al mismo tiempo. Por consiguiente, la excitación de las oscilaciones en el punto A empieza cierto tiempo $\tau = |CB|/v$ antes que en el punto B (siendo v la velocidad de onda)

En el instante en que la onda llega al punto B y en este punto comienza la excitación de oscilaciones, la onda secundaria con centro en el punto A será ya un hemisferio de radio $R = |AD| = \tau v = |CB|$. Los radios de las ondas secundarias de los focos que se encuentran entre los puntos A y B varían como muestra la fig. 85. La envolvente de las ondas secundarias es el plano DB, tangente a las superficies esféricas. Este plano es la superficie de onda reflejada. Los rayos reflejados AA_2 y BB_2 son perpendiculares a la superficie de onda DB. El ángulo γ entre la perpendicular a la superficie reflectora y el rayo reflejado se llama *ángulo de reflexión*.

Como $|AD| = |CB|$ y los triángulos ADB y ACB son rectángulos, $\widehat{DBA} = \widehat{CAB}$. Pero $\alpha = \widehat{CAB}$ y $\gamma = \widehat{DBA}$, por ser ángulos cuyos lados son perpendiculares. Por consiguiente, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia[1]:

$$\alpha = \gamma. \tag{4.5}$$

Además, como se deduce de la construcción de Huygens el rayo incidente, el reflejado y la perpendicular levantada en el punto de incidencia, se encuentran en un plano. En esto consiste la *ley de la reflexión de las ondas*[2].

---

[1] Aquí y en adelante, en las relaciones algebraicas se entiende por *ángulo* su valor medido en radianes (o en grados).

[2] En el límite de separación de dos medios la onda no solo se refleja, sino que parcialmente penetra en el segundo medio, cambiando la dirección en que se propaga (es decir, refractándose). Este fenómeno no vamos a estudiarlo aquí.

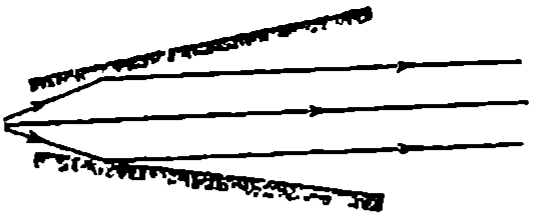


Fig. 86

La reflexión del sonido en las paredes solidas se utiliza en los portavoces, dispositivos simples que sirven para crear una onda sonora dirigida El principio en que se basa el funcionamiento del portavoz se ve claramente en la fig. 86 En virtud de la reflexión del sonido en la superficie interna del aparato, desde la fuente de sonido se propaga, siguiendo el eje del portavoz, una onda más potente que cuando la fuente está desprovista de tal utensilio.

La reflexión del sonido en las paredes, en el suelo y en el techo influye mucho en la audibilidad del sonido en los locales. El sonido reflejado se mezcla con el emitido inicialmente y en las grandes salas lo deforma Por eso las palabras pueden hacerse poco inteligibles. El tapizado de los sillones y las cortinas disminuyen la intensidad de las ondas reflejadas y con esto influyen notablemente en la calidad del sonido. Esto se tiene en cuenta cuando se diseñan salas de espectáculos. Existe una asignatura tecnica especial denominada *acústica arquitectónica.*

4.11. Difracción de las ondas

Al estudiar en el § 4 10 la reflexión de las ondas hemos supuesto implícitamente que la superficie reflectora era muy grande Pero es muy frecuente que la onda encuentre a su paso un obstáculo pequeño (en comparación con la longitud de onda). La relación entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo determina en lo fundamental el comportamiento de la onda.

Las ondas son capaces de contornear el borde de los obstáculos Cuando las dimensiones del obstáculo son pequeñas, las ondas, rodeando el borde de éste, se cierran detrás de él Así, las olas del mar rodean libremente una roca que sobresale del agua si sus dimensiones son menores que la longitud de la onda o comparables con ella. Detrás de la roca las olas se propagan como si ésta no existiera (rocas pequeñas en la fig. 87) Exactamente lo mismo la

Fig. 87

Fig. 88

Fig. 89

onda originada por una piedrecita lanzada a un estanque rodea a una varilla que emerja del agua. Únicamente cuando el tamaño del obstáculo es grande, comparado con la longitud de onda (roca grande en la fig. 87), detrás de éste se producirá una sombra, las ondas no penetran detrás de él.

Las ondas sonoras también son capaces de rodear los obstáculos. La señal emitida por un automóvil se puede oír detrás de la esquina de una casa cuando aquél aún no se ve. En un bosque los árboles impiden que las personas se vean. Para no perderse, éstas se llaman de vez en cuando. Las ondas sonoras, a diferencia de las de la luz, rodean libremente los troncos de los árboles y conducen la voz hasta la persona invisible.

La desviación de las ondas de su propagación rectilínea y el rodeo por ellas de los obstáculos recibe el nombre de difracción (del latín *diffractus*, roto, quebrado). La difracción es propia de todo proceso ondulatorio en la misma medida que la interferencia. Durante la difracción tiene lugar una deformación de las superficies de onda en los bordes de los obstáculos.

La difracción de las ondas se manifiesta claramente en los casos en que las dimensiones del obstáculo que encuentran a su paso las ondas es menor que la longitud de onda o comparable con ella.

El fenómeno de la difracción de las ondas se puede observar muy bien en la superficie del agua, si en el camino que aquéllas recorren se interpone una pantalla con una rendija, cuya anchura sea menor que la longitud de la onda (fig. 88). Se ve claramente que más allá de la pantalla se propaga una onda circular, como si en la rendija hubiera un cuerpo oscilante, es decir, un foco de ondas. De acuerdo con el principio de Huygens, precisamente esto es lo que debería tener lugar. Los focos secundarios que aparecen en la estrecha rendija están tan próximos uno de otro que pueden considerarse como una fuente puntual.

Si la anchura de la rendija es grande, comparada con la longitud de onda, el aspecto de la propagación de las ondas más allá de la pantalla es otro completamente distinto (fig. 89). La onda pasa por la rendija sin que su forma varíe apenas. Sólo en los bordes puede notarse una pequeña deformación de la superficie de onda, en virtud de la cual la onda penetra parcialmente en el espacio que hay detrás de la pantalla.

El principio de Huygens da la posibilidad de comprender por qué se produce la difracción. Las ondas secundarias que emiten las partes del medio penetran detrás de los bordes del obstáculo, que se encuentra en el camino de propagación de la onda. No obstante, partiendo del enunciado del principio de Huygens dado anteriormente, sería imposible explicar la difracción en todos sus detalles. Este principio requería ser precisado como lo hizo el científico francés Augustin FRESNEL a principios del siglo XIX.

Según Fresnel, la superficie de onda en todo instante no es la simple envolvente de las ondas secundarias, sino el resultado de la interferencia de éstas (principio de Huygens–Fresnel).

¿?

1. ¿Qué ondas se llaman coherentes?
2. ¿A qué se llama interferencia?
3. Enuncie las condiciones de los máximos y de los mínimos de una figura de interferencia.
4. ¿La anulación recíproca de las ondas en un mínimo de interferencia, significa que la energía de las ondas se convierte en otras formas de energía?
5. ¿Cómo se enuncia el principio de Huygens?
6. ¿En qué condiciones la difracción de las ondas se manifiesta con mayor nitidez?

Ejercicio 4

1. El eco de un disparo de fusil llega al tirador al cabo de 4 s de haber disparado. ¿A qué distancia s de éste se encuentra el obstáculo en el cual se ha reflejado el sonido? La velocidad del sonido en el aire tómese igual a 330 m/s.
2. A la distancia $s = 1060$ m del observador se da un martillazo a un raíl. El observador, aplicando un oído a dicho raíl, oye el sonido con una antelación $\tau = 3$ s respecto del tiempo que tarda en llegar por el aire. ¿A qué es igual la velocidad v_1 del sonido en el acero? Como velocidad del sonido en el aire tómese $v = 330$ m/s.
3. Determinar la velocidad del sonido en el agua si las oscilaciones con período $T = 0{,}005$ s generan una onda sonora de longitud $\lambda = 7{,}175$ m.
4. Hallar la diferencia de fase entre dos puntos de una onda, si la diferencia de sus distancias al foco es de 25 cm y la frecuencia de las oscilaciones $\nu = 680$ Hz. Tomar la velocidad del sonido v igual a 340 m/s.
5. ¿En cuántas veces varía la longitud de una onda sonora al pasar el sonido del aire al agua? La velocidad del sonido en el agua es de 1435 m/s, y en el aire, de 340 m/s.

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 4

Se llama onda la propagación de las oscilaciones en el espacio con el correr del tiempo. La onda trasporta energía, pero no transporta la sustancia del medio.

Existen ondas transversales y ondas longitudinales. En la onda transversal las oscilaciones se efectúan perpendicularmente a la dirección de propagación, y en la longitudinal, a lo largo de esta dirección.

La distancia entre los puntos de una onda más próximos entre sí, que oscilan en la misma fase, se llama longitud de onda.

Todas las ondas se propagan con velocidad finita. La longitud de onda λ depende de la velocidad v de propagación de la onda y de la frecuencia ν de las oscilaciones:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

Las ondas longitudinales, que con la frecuencia de 17 a 20000 Hz se propagan en un medio, reciben el nombre de ondas sonoras o acústicas. La velocidad de las ondas sonoras depende de las propiedades del medio y de la temperatura.

La intensidad del sonido está determinada por la amplitud de las oscilaciones, y la altura, por la frecuencia de éstas.

Tienen muchas aplicaciones las ondas ultrasonoras, cuya frecuencia de oscilación es de más de 20000 Hz. Estas ondas dan la posibilidad de crear estrechos haces dirigidos.

Cuando varias ondas se superponen unas a otras, las oscilaciones producidas por ellas se suman. La composición en el espacio, con la cual se origina una distribución constante con el tiempo de la amplitud de las oscilaciones resultantes, se denomina interferencia. Si la diferencia de marcha de dos ondas es igual a un número entero de longitudes de onda, las ondas se refuerzan una a otra. Si la diferencia de marcha es igual a un número impar de semilongitudes de onda, las ondas se atenúan.

Una figura de interferencia estable sólo se observa cuando las ondas que se componen son coherentes. Las ondas coherentes tienen la misma frecuencia y una diferencia de fase que no varía con el tiempo.

Las ondas son capaces de rodear un obstáculo. La desviación de las ondas de su propagación rectilínea y el rodeo por ellas de los obstáculos recibe el nombre de difracción. La difracción de las ondas se manifiesta claramente en los casos en que las dimensiones de los obstáculos son menores que la longitud de onda o comparables con ella.

Huygens enunció el principio general que describe el comportamiento de las ondas. Según el principio de Huygens todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se convierte en manantial de ondas secundarias.

5 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

5.1. Relación entre el campo eléctrico alterno y el campo magnético alterno

Al estudiar las oscilaciones eléctricas nos valimos de las leyes de la electrodinámica, conocidas por el curso anterior de física. Pero estos conocimientos son insuficientes para comprender el mecanismo de la formación y propagación de las ondas electromagnéticas. Por esta razón, después de repasar los postulados fundamentales de la electrodinámica estudiados en dicho curso daremos a conocer nuevos hechos.

POSTULADOS FUNDAMENTALES DE LA ELECTRODINÁMICA. Vamos a repasar brevemente los postulados fundamentales de la electrodinámica a que nos hemos venido refiriendo hasta ahora.

Las partículas cargadas eléctricamente, tanto en reposo como en movimiento, crean a su alrededor un campo eléctrico Las líneas de intensidad de este campo empiezan en las cargas positivas y terminan en las negativas. El campo eléctrico actúa sobre las partículas cargadas con independencia de que estén en reposo o en movimiento.

La corriente eléctrica (conjunto de partículas cargadas en movimiento) crea a su alrededor un campo magnético Las líneas de inducción magnética rodean a los conductores con corriente y siempre son cerradas. Estos campos se llaman rotacionales El campo magnético actúa sobre la corriente eléctrica, es decir, únicamente sobre las partículas cargadas que se mueven La corriente eléctrica continua crea un campo magnético cuya inducción no varía con el tiempo.

Sólo al tratar de la inducción electromagnética pasamos a estudiar los campos variables con el tiempo. Aquí se puso de manifiesto un hecho fundamental nuevo: el campo magnético alternativo genera un campo eléctrico cuyas líneas de intensidad son cerradas. Así, pues, el campo eléctrico puede ser creado no sólo por las cargas eléctricas, sino también por un campo magnético variable

Cuando la inducción magnética $\vec{B}$ varía con el tiempo se produce un campo eléctrico, cuyas líneas de intensidad envuelven a las líneas de inducción magnética (fig 90, *a*). Cuanto más rápidamente cambia la inducción magnética, tanto mayor es la intensidad del campo eléctrico.

De acuerdo con la ley de Lenz, cuando la inducción magnética crece ($\Delta B/\Delta t > 0$), el sentido de la intensidad $\vec{E}$ del campo eléctrico forma un "TORNILLO LEVÓGIRO" con el sentido del vector $\vec{B}$. Esto significa que si un tornillo roscado a izquierdas se hace girar en el sentido de la intensidad del campo eléctrico, el movimiento de avance del tornillo coincidirá con el sentido de la inducción magnética.

APARICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CUANDO VARÍA EL CAMPO MAGNÉTICO. J.C Maxwell, cuando estudiaba las propiedades del

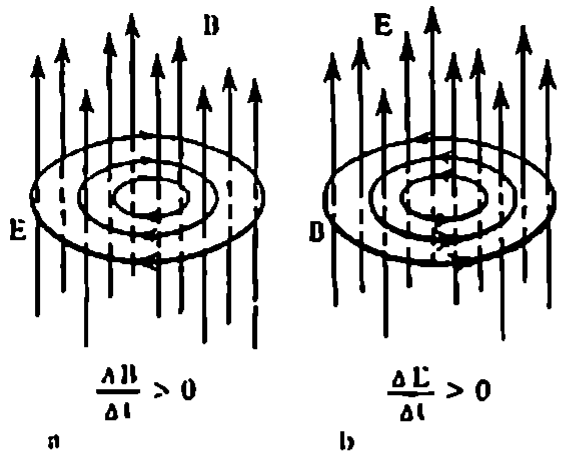


Fig. 90

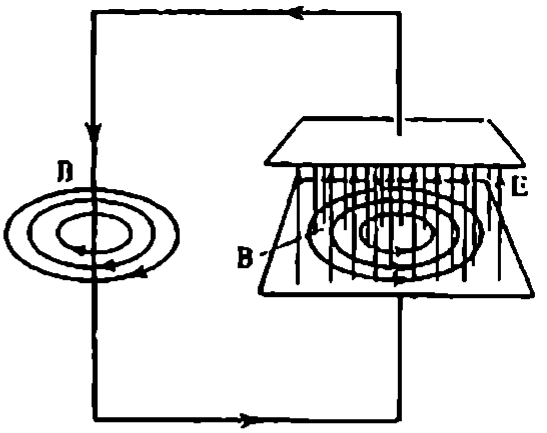


Fig. 91

campo electromagnético, se planteó la pregunta: ¿si el campo magnético variable crea un campo eléctrico, no existirá en la naturaleza el proceso inverso? ¿No creará a su vez el campo eléctrico variable un campo magnético? Este razonamiento, dictado por la seguridad en la unidad de la naturaleza, en la armonía interna de las leyes de la naturaleza, constituye la base de la hipótesis de Maxwell.

Maxwell admitió que este tipo de proceso existe realmente en la naturaleza. En todos los casos, en que un campo eléctrico varía con el tiempo, este campo genera otro magnético. Las líneas de inducción magnética de dicho campo magnético envuelven a las líneas de intensidad del campo eléctrico (fig. 90, *b*), de un modo semejante a como las líneas de intensidad de un campo eléctrico abrazan a las líneas de inducción del campo magnético variable. Pero ahora cuando crece la intensidad del campo eléctrico ($\Delta E/\Delta t > 0$) el sentido del vector inducción $\vec{B}$ del campo magnético que se produce forma un "TORNILLO DEXTRÓGIRO" con el sentido del vector $\vec{E}$.

Según la hipótesis de Maxwell, el campo magnético que se crea, por ejemplo, al cargar un condensador, se debe no sólo a la corriente que pasa por el conductor, sino también al campo eléctrico variable que existe en el espacio entre las armaduras del condensador (fig. 91). Además, el campo eléctrico variable crea un campo magnético igual al que se produciría entre las armaduras del condensador si existiera una corriente eléctrica igual a la que pasa por el conductor. El acierto de la hipótesis de Maxwell quedó demostrado experimentalmente cuando se descubrieron las ondas electromagnéticas. Estas ondas existen únicamente porque el campo magnético alternativo crea un campo eléctrico, también alterno, que, a su vez, genera un campo magnético y así sucesivamente.

5.2. Campo electromagnético

Una vez descubierta la interacción entre los campos eléctrico y magnético variables quedó claro que estos campos no existen separados, independientes uno de otro.

Es imposible crear un campo magnético alternativo sin que al mismo

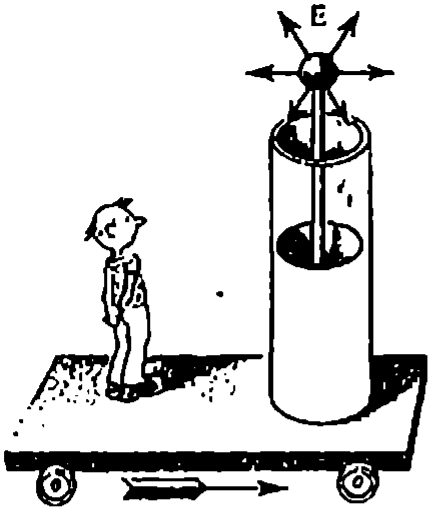


Fig. 92

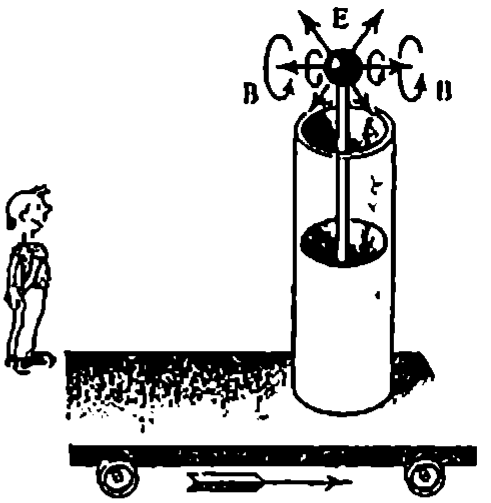


Fig. 93

tiempo se produzca en el espacio un campo eléctrico. Y viceversa, un campo eléctrico alterno no puede existir sin campo magnético.

No es menos importante el que un campo eléctrico sin magnético o un campo magnético sin eléctrico sólo puedan existir con respecto a un determinado sistema de referencia. Así, una carga en reposo solamente crea un campo eléctrico (fig. 92) Pero dicha carga sólo está en reposo con respecto a un determinado sistema de referencia. Con respecto a otros sistemas de referencia estará en movimiento y, por consiguiente, creará un campo magnético (fig. 93)

Exactamente lo mismo, en el sistema de referencia asociado a un imán solo se manifiesta el campo magnético. Pero un observador en movimiento respecto del imán descubrirá también el campo eléctrico El hecho es que en el sistema de referencia en movimiento respecto del imán, el campo magnético varía con el tiempo a medida que el observador se acerca a éste y a medida que se aleja de él Pero un campo magnético variable con el tiempo genera un campo eléctrico rotacional (fenómeno de la inducción electromagnética)

Por lo tanto, carece de sentido afirmar que en un punto dado del espacio existe solamente un campo eléctrico o solamente un campo magnético, si no se indica respecto de que sistema de referencia se consideran estos campos. La ausencia del campo eléctrico en el sistema en que el imán está en reposo no significa, ni mucho menos, que el campo eléctrico no existe en absoluto Respecto de un sistema de referencia cualquiera que se mueva con relación al imán, el campo eléctrico puede ser descubierto

Los campos eléctrico y magnético son manifestaciones de un todo único, el *campo electromagnético*. El campo electromagnético es una forma particular de la materia. Este campo existe en realidad, es decir, independientemente de nosotros y de nuestros conocimientos acerca de él.

En dependencia de en qué sistema de referencia se consideran los procesos electromagnéticos, se ponen de manifiesto unos u otros aspectos del todo único, es decir, del campo electromagnético. Todos los sistemas inerciales de referencia son equivalentes. Por esta razón no puede darse preferencia a ninguna de las manifestaciones del campo electromagnético.

5.3. Cómo se transmiten las interacciones electromagnéticas

Las leyes fundamentales de la naturaleza, entre las cuales se encuentran las del electromagnetismo descubiertas por Maxwell, son admirables en el sentido siguiente. estas leyes pueden dar MUCHO MAS de lo que se encierra en los hechos que sirvieron de base para su obtención. Si cada ley respondiera únicamente a los hechos de los cuales se dedujo, habria tantas leyes como fenómenos existen el la naturaleza. En vez de una ciencia moderna tendriamos una inmensa acumulación de datos acerca de los procesos que se observan en la naturaleza, pero no podríamos predecir nada.

Entre las consecuencias innumerables, interesantisimas e importantes, que se deducen de las leyes del campo magnético formuladas por Maxwell, hay una que merece especial atención Es ésta la consecuencia de que la interacción electromagnética se propaga con velocidad finita

De acuerdo con la teoria de la acción a distancia, la fuerza de Coulomb que actúa sobre una carga eléctrica cambia inmediatamente, si la carga vecina se desplaza de su sitio. La acción se transmite instantáneamente. Desde el punto de vista de la acción a distancia no puede ocurrir de otra forma: puesto que una carga "siente" directamente a través del vacio la presencia de la otra.

Pero, segun la teoría de la acción próxima, la cuestión se plantea de un modo completamente distinto y más complejo La traslación de la carga hace que varie el campo eléctrico junto a ella Este campo eléctrico variable genera un campo magnético también variable en las zonas contiguas del espacio El campo magnético variable crea, a su vez, un campo eléctrico variable y asi sucesivamente.

Este proceso se representa esquemáticamente en la fig. 94. El campo magnético alternativo, cuyas lineas de inducción son B, engendra los torbellinos del campo eléctrico, cuyas lineas de intensidad son E. Este campo eléctrico crea el campo magnético de lineas de inducción B_1 y asi sucesivamente.

El desplazamiento de una carga produce, de este modo, una "salpicadura" del campo electromagnético que, propagándose, abarca cada vez más zonas del espacio circundante, reconstruyendo por el camino el campo que existia antes de que la carga se desplazase Finalmente, la "salpicadura" alcanza a una segunda carga, lo que hace que varie la fuerza que actúa sobre ella. Pero esto ocurre no en el instante en que se produjo el desplazamiento de la primera carga. El proceso de propagación de la perturbación electromagnetica, cuyo mecanismo descubrió Maxwell, transcurre a velocidad finita, aunque ésta es muy grande

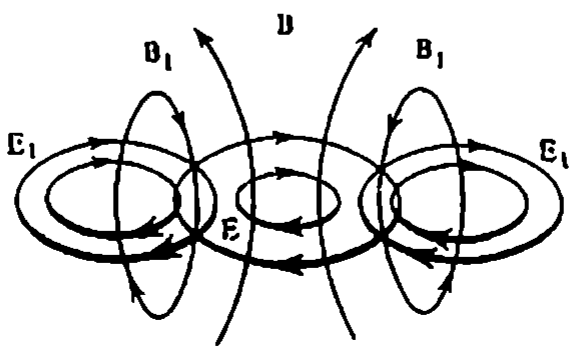


Fig. 94

En esto consiste la propiedad fundamental del campo, que elimina todas las dudas acerca de su realidad.

Maxwell demostró matemáticamente que la velocidad de propagación de este proceso es igual a la velocidad de la luz en el vacío.

5.4. Onda electromagnética

Imaginese que una carga eléctrica no ha sido simplemente desplazada de un punto a otro, sino que se ha hecho oscilar a lo largo de cierta recta. La carga se mueve de un modo semejante a como lo hace un cuerpo suspendido por un muelle, pero sus oscilaciones se efectúan con una frecuencia mucho mayor. El campo eléctrico en la proximidad inmediata a la carga empieza a variar periódicamente. El período de estas variaciones será, evidentemente, igual al período de las oscilaciones de la carga. El campo eléctrico alternativo generará un campo magnético variable periódicamente y éste, a su vez, hará que aparezca otro campo eléctrico alternativo, pero ya a mayor distancia de la carga, y así sucesivamente.

No vamos a analizar en detalles el complejo proceso de formación del campo electromagnético que origina una carga oscilante. Daremos a conocer únicamente el resultado final.

En el espacio que rodea a la carga, abarcando cada vez más regiones, se produce un sistema de campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares entre sí, que varían periódicamente. En la fig. 95 se muestra la "fotografía instantánea" de este sistema de campos.

Se forma la llamada *onda electromagnética*, que avanza en todas las direcciones a partir de la carga oscilante. En cada punto del espacio los campos eléctricos y magnéticos se intercambian periódicamente con el tiempo. Cuanto más lejos de la carga se encuentre el punto, tanto más tarde llegarán a él las oscilaciones de los campos. Por consiguiente, a distintas distancias de la carga las oscilaciones se producen en fases diferentes.

Las oscilaciones de los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ en un punto cualquiera coinciden en fase. La distancia entre dos puntos inmediatos en los cuales las oscilaciones se cumplen en fases iguales es la longitud de onda λ. En un instante dado los valores de los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ varían periódicamente en el espacio con un período λ.

Las direcciones de los vectores oscilantes intensidad del campo eléctrico e inducción magnética del campo son perpendiculares a la dirección en que se propaga la onda. La onda electromagnética es transversal.

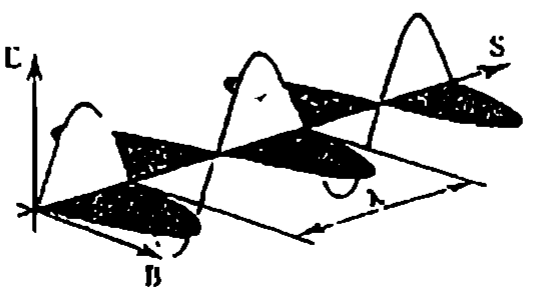


Fig. 95

Heinrich Hertz (1857-1894), eminente físico alemán. En 1886 demostró experimentalmente, por vez primera, la existencia de las ondas electromagnéticas. Estudiando estas ondas estableció que las propiedades principales de las ondas electromagnéticas eran idénticas a las de las ondas luminosas. Sus trabajos sirvieron de demostración experimental de que la teoría del campo electromagnético y, en particular, la teoría electromagnética de la luz, era justa. Las ecuaciones de Maxwell en su forma actual fueron escritas por Hertz.
En 1886 Hertz observó por primera vez el efecto fotoeléctrico. En su libro "Principios de mecánica" (1894) dio una nueva formulación a las leyes de la mecánica clásica, en la cual no se utiliza el concepto de fuerza.

Así, pues, en la onda electromagnética los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí y a la dirección en que se propaga la onda. Si un sacacorchos de hélice a derechas se hace girar en el sentido que va del vector $\vec{E}$ al vector $\vec{B}$, su movimiento de avance coincidirá con el sentido del vector velocidad $\vec{c}$ de la onda.

Las ondas electromagnéticas son emitidas por cargas oscilantes. Es esencial el hecho de que la velocidad del movimiento de estas cargas varíe con el tiempo, es decir, que se muevan CON ACELERACIÓN. La existencia de la aceleración es la condición principal para la radiación de las ondas electromagnéticas. El campo electromagnético es emitido apreciablemente no sólo cuando una carga oscila, sino también cuando la velocidad de ésta varía rápidamente, además la intensidad de la onda emitida es tanto mayor cuanto mayor es la aceleración con que se mueve la carga.

Intuitivamente podemos imaginarnos esto como sigue. Cuando la partícula cargada se mueve con velocidad constante, los campos eléctrico y magnético que ella crea la siguen como si fueran una cola ondeante. Pero cuando la partícula se acelera se pone de manifiesto la inercia que le es inherente al campo electromagnético. El campo se "desprende" de la partícula y empieza a existir independientemente en forma de ondas electromagnéticas.

La energía del campo electromagnético de la onda en un instante dado varía periódicamente en el espacio al variar los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$. La onda progresiva lleva consigo una energía que se traslada con la velocidad c a lo largo de la dirección en que se propaga la onda. En virtud de esto, la energía de la onda electromagnética en una región cualquiera del espacio varía periódicamente con el tiempo.

Maxwell estaba completamente convencido de que las ondas electromagnéticas eran reales, pero no llegó a vivir hasta su descubrimiento experimental. Diez años después de su muerte las ondas electromagnéticas eran descubiertas experimentalmente por H. R. Hertz.

5.5. Emisión de las ondas electromagnéticas

La onda electromagnética se forma en virtud de la relación mutua entre los campos eléctrico y magnético variables. La variación de un campo hace que aparezca el otro. En el § 5.1 se dijo que cuanto más rápida es la variación con el tiempo de la inducción magnética, tanto mayor es la intensidad del campo eléctrico que surge. Y, a su vez, cuanto más rápidamente varía la intensidad del campo eléctrico, tanto mayor es la inducción magnética.

Por consiguiente, para que se formen ondas electromagnéticas de gran intensidad es necesario crear oscilaciones electromagnéticas de frecuencia suficientemente alta. Precisamente con esta condición la intensidad $\vec{E}$ del campo eléctrico y la inducción $\vec{B}$ del campo magnético varían con rapidez.

Las oscilaciones de alta frecuencia (mucho mayor que la de la corriente industrial de 50 Hz) se pueden obtener con un circuito oscilante. La frecuencia de las oscilaciones

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

será tanto mayor cuanto menores sean la inductancia y la capacidad del circuito.

CIRCUITO OSCILANTE CERRADO. No obstante, una frecuencia grande de las oscilaciones electromagnéticas no garantiza aun la emisión intensa de ondas electromagnéticas. Un circuito oscilante ordinario, como el representado en la fig. 24 (que se puede llamar cerrado), es un sistema eléctrico casi cerrado. En este circuito la intensidad de la corriente en un instante dado es igual en todas las partes del circuito. Un circuito así emite muy débilmente ondas electromagnéticas.

A cada parte de una espira de la bobina del circuito le corresponde otra parte, situada a poca distancia de ella, en el extremo opuesto del diámetro de la espira, por la cual pasa la corriente en sentido contrario (fig. 96). A gran distancia de la espira estas dos partes crean campos magnéticos cuyas inducciones son casi iguales en módulo y están dirigidas en sentidos opuestos. Como resultado, lejos del circuito oscilante los campos se atenúan uno a otro, de tal modo que el campo magnético resulta estar concentrado únicamente dentro de la bobina.

Así mismo se plantea el problema con los campos eléctricos de las cargas que hay en las armaduras del condensador. Estas cargas son iguales en módulo y tienen signos opuestos. Casi todo el campo eléctrico está concetrado entre las placas y, lejos de ellas, los campos de las cargas de signos contrarios casi se compensan totalmente uno a otro.

CIRCUITO OSCILANTE ABIERTO. Para obtener las ondas electromagnéticas utilizó Hertz un dispositivo simple que hoy se conoce con el de *oscilador o vibrador de Hertz*. Este dispositivo no es más que un *circuito oscilante abierto*.

Al circuito oscilante abierto se puede llegar partiendo del cerrado si paulatinamente se van separando las placas del condensador (fig. 97), dismi-

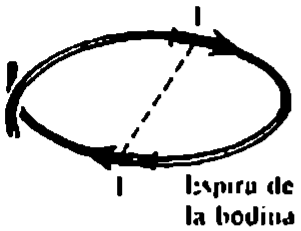


Fig. 96

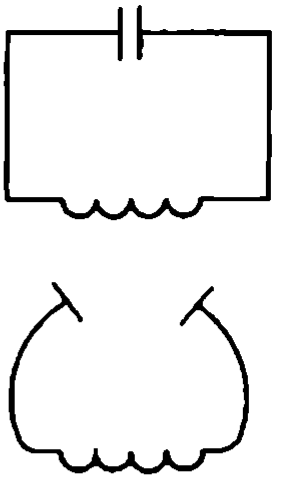


Fig. 97

muyendo su área y reduciendo a la vez el número de espiras de la bobina. En definitiva se obtiene simplemente un conductor recto. Esto es un circuito oscilante abierto. La capacidad y la inductancia del oscilador de Hertz son pequeñas. Por eso la frecuencia de las oscilaciones es bastante grande.

En el circuito oscilante abierto las cargas no están concentradas en los extremos, sino que están distribuidas por todo el conductor. La corriente, en un instante dado, está dirigida en el mismo sentido en todas las secciones del conductor, pero su intensidad no es la misma en todas ellas. En los extremos la intensidad es nula y en el centro alcanza el máximo. (Se recordará que en los circuitos de corriente alterna ordinarios la intensidad de la corriente en un instante dado es igual en todas las secciones.).

Para excitar las oscilaciones en el circuito abierto, en los tiempos de Hertz procedían como sigue. Cortaban el conductor por la mitad de tal modo que quedase un pequeño espacio de aire, llamado espacio de chispa (fig. 98). Ambas partes del conductor se cargaban hasta que la diferencia de potencial era grande. Cuando esta diferencia superaba cierto valor límite, saltaba la chispa (fig. 99), el circuito se cerraba y en el oscilador se producían oscilaciones.

Los campos eléctricos y magnéticos que crean las distintas partes del oscilador a grandes distancias de éste ya no se compensan entre sí.

Las oscilaciones en el circuito oscilante serán amortiguadas por dos causas. PRIMERA, por la existencia en él de resistencia óhmica, y SEGUNDA, debido a que el oscilador emite ondas electromagnéticas y gasta energía en esto. Una vez que las oscilaciones cesan, ambos conductores vuelven a irse cargando de la

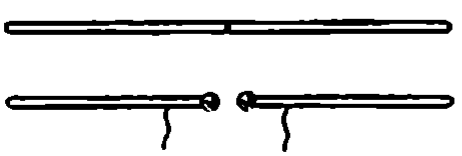


Fig. 98

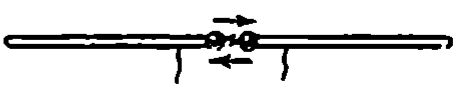


Fig. 99

fuente hasta que se produce la ruptura del espacio de chispa y todo se repite de nuevo.

En la actualidad para obtener oscilaciones no amortiguadas en el circuito oscilante abierto, éste se acopla por inducción al circuito oscilante de un generador de lámpara.

DEPENDENCIA DE LA ENERGÍA DE LAS ONDAS EMITIDAS RESPECTO DE LA FRECUENCIA DE LAS OSCILACIONES. La energía electromagnética que emite un oscilador en la unidad de tiempo depende mucho de la frecuencia de las oscilaciones de la corriente eléctrica. Esta dependencia se puede establecer partiendo de los razonamientos que siguen. La energía del campo eléctrico es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo (véase el libro "Física 3" (Ed. MIR). Puede mostrarse que la energía del campo magnético es proporcional al cuadrado de la inducción magnética. La energía total de la onda es igual a la suma de las energías de los campos eléctrico y magnético. Pero las amplitudes de las oscilaciones tanto de la intensidad del campo eléctrico como de la inducción magnética en la onda electromagnética son proporcionales a la aceleración de las partículas cargadas emisoras de las ondas electromagnéticas. Por eso la energía radiada es proporcional al cuadrado de la amplitud de la aceleración.

La amplitud de la aceleración de las partículas en movimiento oscilatorio armónico es proporcional, a su vez, al cuadrado de la frecuencia (véase el § 1.8). Por consiguiente, la energía emitida o radiada en la unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia.

Si la frecuencia de las oscilaciones aumenta solamente dos veces, la energía radiada se multiplica por 16^{1}. En las antenas de las estaciones emisoras de radio se excitan oscilaciones con frecuencias desde decenas de millares hasta decenas de millones de hertzios. La radiación de las corrientes alternas industriales, con frecuencia de 50 Hz, prácticamente no se nota.

EXPERIMENTOS DE HERTZ. Hertz obtuvo las ondas electromagnéticas excitando en el oscilador, por medio de una fuente de alta tensión, una serie de impulsos de corriente rápidamente variable. Las oscilaciones de las cargas eléctricas en el oscilador crean una onda electromagnética. Pero las oscilaciones en el oscilador no las realiza una sola partícula cargada, sino un número enorme de electrones que se mueven acordadamente. En la onda electromagnética los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí, encontrándose el vector $\vec{E}$ en el plano que pasa por el oscilador y siendo el vector $\vec{B}$ perpendicular a dicho plano. En la fig. 100 se muestran las líneas de los campos eléctrico y magnético alrededor del oscilador en un instante fijado. En el plano horizontal se encuentran las líneas de inducción del campo magnético, y en el vertical, las líneas de intensidad del campo eléctrico. La emisión de ondas tiene su intensidad máxima en la dirección perpendicular al eje del oscilador[1]. A lo largo del eje no se produce radiación.

Hertz registraba las ondas electromagnéticas por medio de un oscilador receptor, consistente en un dispositivo igual que el oscilador emisor. Bajo la acción del campo eléctrico alternativo de la onda electromagnética, en el

[1] Compare las representaciones gráficas de la onda electromagnética en las figs. 95 y 100.

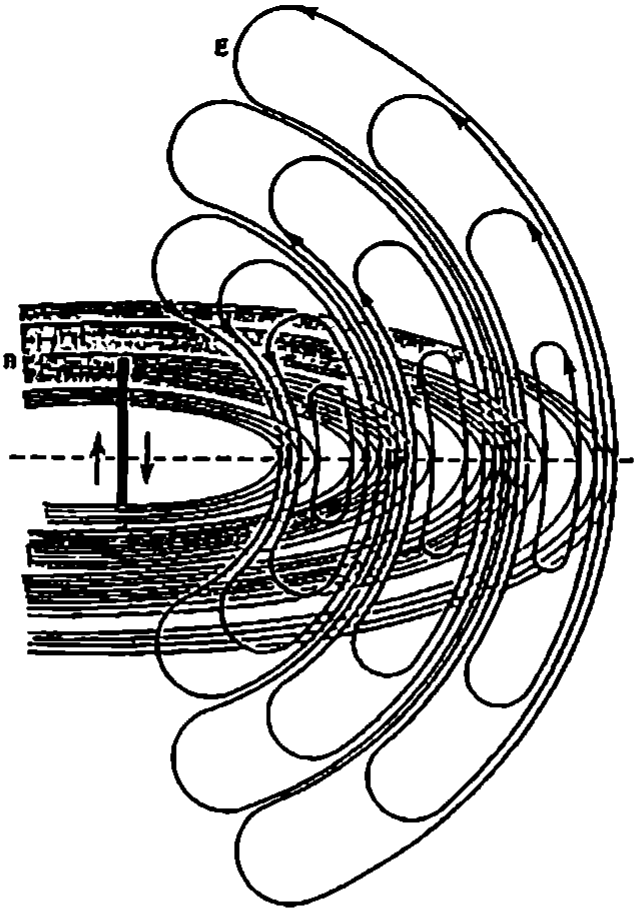


Fig. 100

oscilador receptor se excitaban oscilaciones de la corriente. Si la frecuencia propia del oscilador receptor coincide con la frecuencia de las ondas electromagnéticas se observa la resonancia. Las oscilaciones en el oscilador receptor se efectúan con gran amplitud Hertz las descubrió observando las chispas en el pequeñísimo espacio entre los conductores del oscilador receptor.

Hertz no sólo observó las ondas electromagnéticas, sino que también descubrió que éstas se comportan de un modo semejante a otros tipos de ondas. En particular, observó la reflexión de las ondas electromagnéticas en una chapa metálica y la interferencia de las mismas. Al componerse la onda procedente del oscilador con la onda reflejada en la chapa metálica se forman los máximos y mínimos de una figura de interferencia (véase el § 4.9) Desplazando el oscilador receptor se puede hallar la posición de los máximos y determinar la longitud de onda.

VELOCIDAD DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS En los experimentos de Hertz la longitud de onda era de varias decenas de centímetros. Calculando la frecuencia propia de las oscilaciones electromagnéticas del oscilador, Hertz pudo hallar la velocidad de la onda electromagnética por la fórmula $v = \lambda\nu$ Esta velocidad resultó ser igual a la velocidad de la luz: $c = 300\,000$ km/s.

Los experimentos de Hertz confirmaron brillantemente las predicciones teóricas de Maxwell.

¿?

1. ¿Como resultado de qué procesos se produce el campo magnético?
2. ¿Por qué la afirmación de que en un punto dado del espacio existe solamente un campo eléctrico o solamente un campo magnético no es del todo determinada?
3. ¿Cómo están orientados mutuamente los vectores $\vec{E}$, $\vec{B}$ y $\vec{c}$ en la onda electromagnética?
4. ¿Cómo debe moverse una partícula para que emita ondas electromagnéticas?
5. ¿Cómo depende la energía que emite un oscilador en la unidad de tiempo de la frecuencia de las oscilaciones?

5.6. A. S. Popov, inventor de la radio

Los experimentos de Hertz, cuya descripción se hizo pública en 1888, interesaron a todos los físicos del mundo. Los científicos empezaron a buscar las vías de perfeccionamiento del emisor y del receptor de las ondas electromagnéticas.

En Rusia uno de los primeros en ocuparse del estudio de las ondas electromagnéticas fue el profesor de los cursos de minas, para oficiales, de Kronshtadt, Alexandr Popov. Éste empezó por repetir los experimentos de Hertz y después encontró un procedimiento más seguro y sensible de registrar las ondas electromagnéticas.

Como elemento directamente sensible a las ondas electromagnéticas empleó el *cohesor*. Este dispositivo consiste en un tubo de vidrio con dos electrodos. Dentro del tubo hay finas limaduras metálicas. Su funcionamiento se basa en la influencia de las cargas eléctricas sobre los polvos metálicos. En las condiciones normales el cohesor posee gran resistencia, ya que entre las limaduras el contacto que existe es malo. La onda electromagnética que llega crea en el cohesor una corriente alterna de alta frecuencia. Entre las limaduras saltan chispas pequeñísimas que las sueldan. Como resultado la resistencia del cohesor disminuye bruscamente (en los experimentos de Popov desde 100 000 Ω hasta 1000 ó 500 Ω, es decir, de 100 a 200 veces). El dispositivo puede volver a tener gran resistencia si se sacude. Para asegurar la recepción automática necesaria para la comunicación inalámbrica, Popov utilizó como descohesor un timbre eléctrico, el cual sacudía el cohesor después de cada señal recibida. El circuito del timbre eléctrico se cerraba a través del cohesor en el instante en que llegaba la onda electromagnética. Cuando terminaba de recibirse la onda el timbre dejaba de funcionar inmediatamente, ya que su martillito percutía no sólo la campanilla del timbre, sino también el cohesor. La última sacudida dejaba el aparato dispuesto para recibir una nueva onda.

Con el fin de elevar la sensibilidad del aparato, Popov unió a tierra una de las salidas del cohesor y la otra la conectó a un trozo de alambre puesto en alto, con lo que creó la primera *antena receptora*. La puesta a tierra convierte la superficie conductora de ésta en una parte del circuito oscilante abierto, con lo que aumenta la distancia de recepción. Un esquema simplificado del receptor de Popov se da en la fig. 101.

Aunque los receptores de radio modernos se parecen poco al de Popov, los principios básicos de su funcionamiento son los mismos que él utilizó en su

Alexandr Stepánovich Popov (1859-1906), célebre físico ruso, inventor de la radio. Convencido en la posibilidad de la comunicación inalámbrica por medio de las ondas electromagnéticas, construyó el primer receptor de radio del mundo, utilizando como elemento sensible un cohesor. Durante los experimentos de radiocomunicación con los aparatos de Popov se descubrió la reflexión de las ondas hertzianas en los buques.

aparato. El receptor moderno también tiene antena, en la cual la onda que llega excita oscilaciones eléctricas muy débiles. Como en el receptor de Popov, la energía de estas oscilaciones no se emplea directamente en la recepción. Las señales débiles lo único que hacen es regular las fuentes de energía que alimentan los circuitos siguientes. Ahora esta regulación se hace por medio de válvulas electrónicas y de dispositivos semiconductores.

El 7 de mayo de 1895, en la sesión de la Sociedad Físico-química Rusa de San Petersburgo, A. S. Popov demostró el funcionamiento de su aparato, que, en realidad, fue el primer receptor de radio del mundo. El 7 de mayo devino en día de nacimiento de la radio. Este día se conmemora anualmente en la URSS.

Popov continuó con tesón el perfeccionamiento de los aparatos receptores y transmisores. Su tarea inmediata fue la de construir un aparato para transmitir señales a gran distancia. En diciembre de 1897 demostró en la sesión

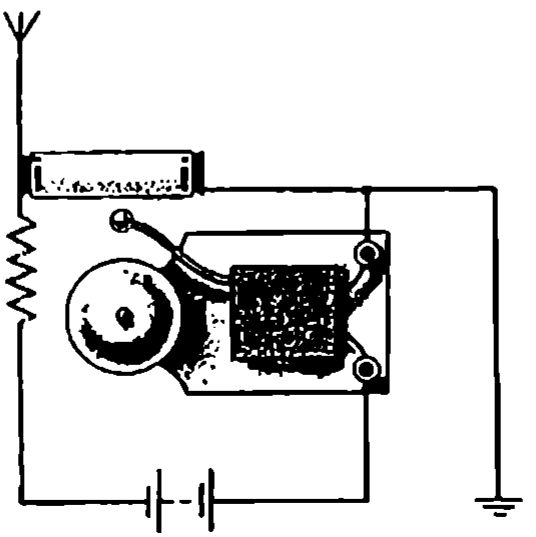


Fig. 101

de la Sociedad Físico-química Rusa la transmisión y recepción del primer radiograma en el mundo.

Al principio la comunicación por radio fue establecida a la distancia de 250 m. Trabajando incansablemente en su invento, Popov consiguió pronto una distancia de comunicación de 600 m. Más tarde, en las maniobras de la escuadra del Mar Negro en 1899, estableció la comunicación por radio a una distancia de más de 20 km, y en 1901 el alcance de la radiocomunicación era ya de 150 km. En esto desempeñó un papel muy importante la nueva estructura del transmisor. El espacio de chispa fue incluido en un circuito oscilante acoplado por inducción a la antena emisora y sintonizado en resonancia con ella. También cambiaron esencialmente los procedimientos de registro de la señal. En paralelo al timbre se conectó un aparato telegráfico que permitió anotar automáticamente las señales. En 1899 se descubrió la posibilidad de recibir señales por medio de un teléfono. A principios del año 1900 la radiocomunicación se utilizó eficazmente durante unos trabajos de salvamento en el Golfo de Finlandia.

Posteriormente, una compañía organizada por el ingeniero italiano Guglielmo MARCONI se dedicó a perfeccionar estos aparatos. Sus experimentos, montados en gran escala, permitieron realizar la transmisión radiotelegráfica a través del Océano Atlántico (1903).

5.7. Principios básicos de la radiocomunicación

Los principios en que se basa la radiocomunicación son los siguientes. La corriente eléctrica alterna de alta frecuencia creada en la antena transmisora produce en el espacio circundante un campo electromagnético rápidamente variable que se propaga en forma de onda electromagnética. Cuando esta onda llega a la antena receptora provoca en ella una corriente alterna de la misma frecuencia que aquella con que funciona el transmisor.

Una etapa muy importante en el desarrollo de la radiocomunicación fue la creación en 1913 del generador de lámpara de oscilaciones electromagnéticas no amortiguadas (véase el § 2.11).

Además de la transmisión de señales telegráficas, consistentes en impulsos cortos y más largos de ondas electromagnéticas (fig. 102), se hizo posible la *comunicación radiofónica* segura y de alta calidad de la palabra y la música por medio de las ondas electromagnéticas.

COMUNICACIÓN RADIOTELEFÓNICA. En la radiotelefonía las oscilaciones de la presión del aire en la onda sonora se transforman por medio de un micrófono en oscilaciones eléctricas de la misma forma. Al parecer, si estas oscilaciones se amplifican y se conducen a la antena, se podrá transmitir

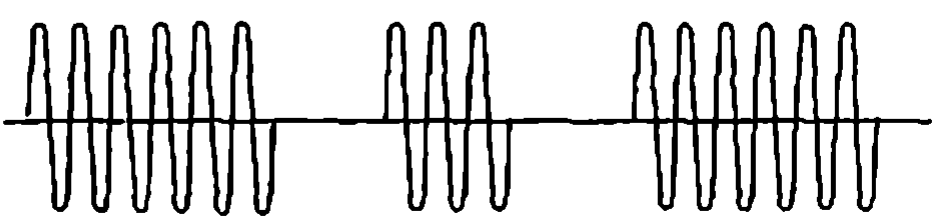


Fig. 102

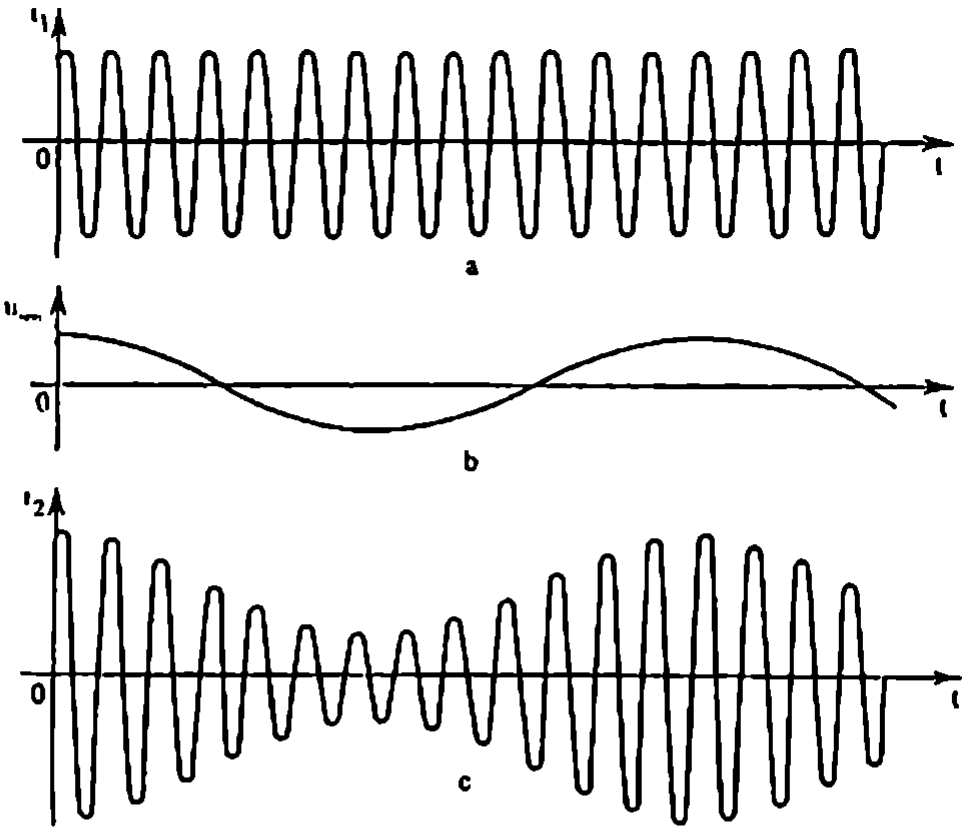


Fig. 103

a distancia la palabra y la música con ayuda de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, este procedimiento de transmisión es irrealizable en la realidad. El hecho es que las oscilaciones de frecuencia sonora son oscilaciones relativamente lentas, y las ondas electromagnéticas de frecuencia baja (acústica) casi no se irradian en absoluto.

MODULACIÓN. Para efectuar la comunicación radiotelefónica hay que utilizar las oscilaciones de alta frecuencia que emite intensamente la antena. Las oscilaciones armónicas no amortiguadas de alta frecuencia las produce un generador de lámpara. Para transmitir el sonido estas oscilaciones se modifican o, como suele decirse, *se modulan*, por medio de oscilaciones eléctricas de frecuencia baja (acústica). Se puede, por ejemplo, modificar con la frecuencia sonora la amplitud de las oscilaciones de alta frecuencia. Este procedimiento recibe el nombre de *modulación de amplitud*. En la fig. 103 se muestran tres gráficas: a) la gráfica de las oscilaciones de alta frecuencia, llamada *frecuencia portadora*, b) la gráfica de las oscilaciones de frecuencia sonora, es decir, de las oscilaciones moduladoras, y c) la gráfica de las oscilaciones de amplitud modulada. Sin la modulación, decía el físico y académico soviético L. I. MANDELSHTAM, podemos en el mejor de los casos constatar que una emisora funciona o no, y nada más. Sin modulación no existe transmisión alguna, ni telegráfica, ni telefónica, ni de televisión.

La modulación es un proceso LENTO. Es un proceso de variaciones en el sistema oscilante de alta frecuencia, en el cual este tiene tiempo de realizar muchas de sus oscilaciones de alta frecuencia antes de que su amplitud varíe algo de un modo apreciable.

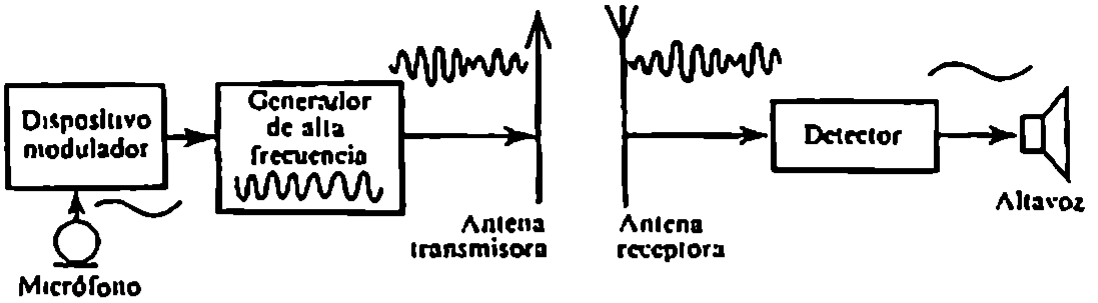


Fig. 104

DETECCIÓN. En el receptor, a partir de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia, se discriminan las oscilaciones de baja frecuencia. Este proceso de transformación de la señal se llama *desmodulación* o *detección*.

La señal obtenida como resultado de la detección corresponde a la señal sonora que actuó sobre el micrófono del transmisor. Una vez amplificadas, las oscilaciones eléctricas de baja frecuencia se pueden transformar en sonido o ser utilizadas para otros fines.

El diagrama sinóptico (de bloques) de un canal de radiodifusión se muestra en la fig. 104.

5.8. Cómo se efectúa la modulación y la detección

La modulación de amplitud de las oscilaciones de alta frecuencia se consigue ejerciendo una acción especial sobre el generador de oscilaciones no amortiguadas. En particular, la modulación se puede efectuar variando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo del triodo de un generador de lámpara Cuanto mayor sea la tensión entre el ánodo y el cátodo, tanto mayor será la amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente en el circuito anódico de la lámpara del generador. Respectivamente, cada periodo llegará al circuito oscilante del generador más energía de la fuente. Esto hará que aumente la amplitud de las oscilaciones eléctricas en el circuito Cuando la tensión anódica disminuya, la energía que cada periodo llegue al circuito oscilante también disminuirá. Por esta razón decrece al mismo tiempo la amplitud de las oscilaciones del circuito

Si la tensión anódica se varía con una frecuencia mucho menor que la frecuencia de las oscilaciones que produce el generador, las variaciones de la amplitud de estas oscilaciones serán, aproximadamente, directamente proporcionales a las modificaciones de la tensión entre el ánodo y el cátodo

Para efectuar la modulación de amplitud se conecta en serie con la fuente de tensión anódica continua una fuente adicional de tensión alternativa de baja frecuencia. Esta segunda fuente puede ser, por ejemplo, el arrollamiento secundario de un transformador, si por su arrollamiento primario pasa una corriente de frecuencia acústica (fig. 105) Como resultado, la amplitud de las oscilaciones en el circuito oscilante del generador cambiará con el ritmo de las variaciones de la tensión anódica. Esto en efecto significa que las oscilaciones de alta frecuencia se modulan según la amplitud de la señal de baja frecuencia

El desarrollo con el tiempo de las oscilaciones moduladas se puede observar

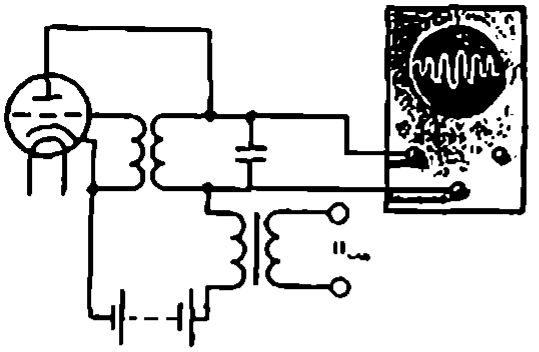


Fig. 105

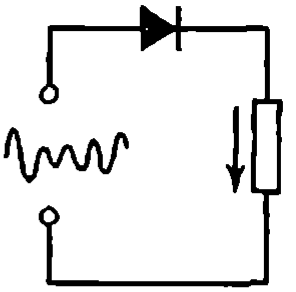


Fig. 106

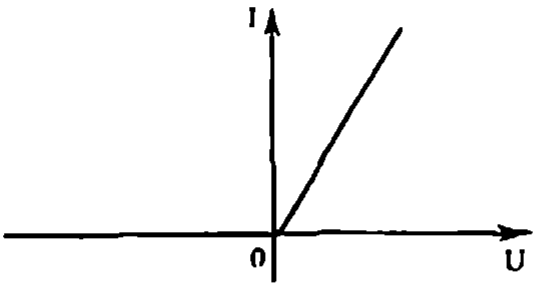


Fig. 107

directamente en la pantalla de un osciloscopio si se hace llegar a él la tensión del circuito oscilante

Además de la modulación de amplitud, en ciertos casos se utiliza la modulación de frecuencia, es decir, la variación de la frecuencia de las oscilaciones de acuerdo con la señal de mando. Su ventaja es una mayor estabilidad respecto de las perturbaciones.

DETECCIÓN. La señal de alta frecuencia modulada captada por el receptor es incapaz, incluso después de amplificada, de producir directamente oscilaciones de la membrana del auricular o de la bocina del altavoz con frecuencia sonora. Sólo puede provocar oscilaciones de alta frecuencia imperceptibles para el oído humano Por eso en el receptor hay que separar primeramente de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia la señal de frecuencia acústica

La detección se efectúa con un dispositivo que contiene un elemento CONDUCTOR UNILATERAL denominado *detector*. Este elemento puede ser un tubo electrónico (diodo de vacío o triodo) o un diodo semiconductor.

Veamos cómo funciona un detector semiconductor. Supongamos que este dispositivo está intercalado en el circuito en serie con la fuente de las oscilaciones moduladas y la carga[1] (fig. 106) La corriente en el circuito pasará con preferencia en el sentido indicado en la figura con la flecha, ya que la resistencia del diodo en el sentido directo es mucho menor que en el inverso En general se puede despreciar la corriente inversa y considerar que el diodo posee conductibilidad unilateral. La característica tensión-intensidad del diodo se puede representar aproximadamente en forma de una línea quebrada compuesta por dos segmentos rectilíneos (fig 107)

[1] Se llama carga del detector la resistencia a la que llegan las oscilaciones de frecuencia acústica.

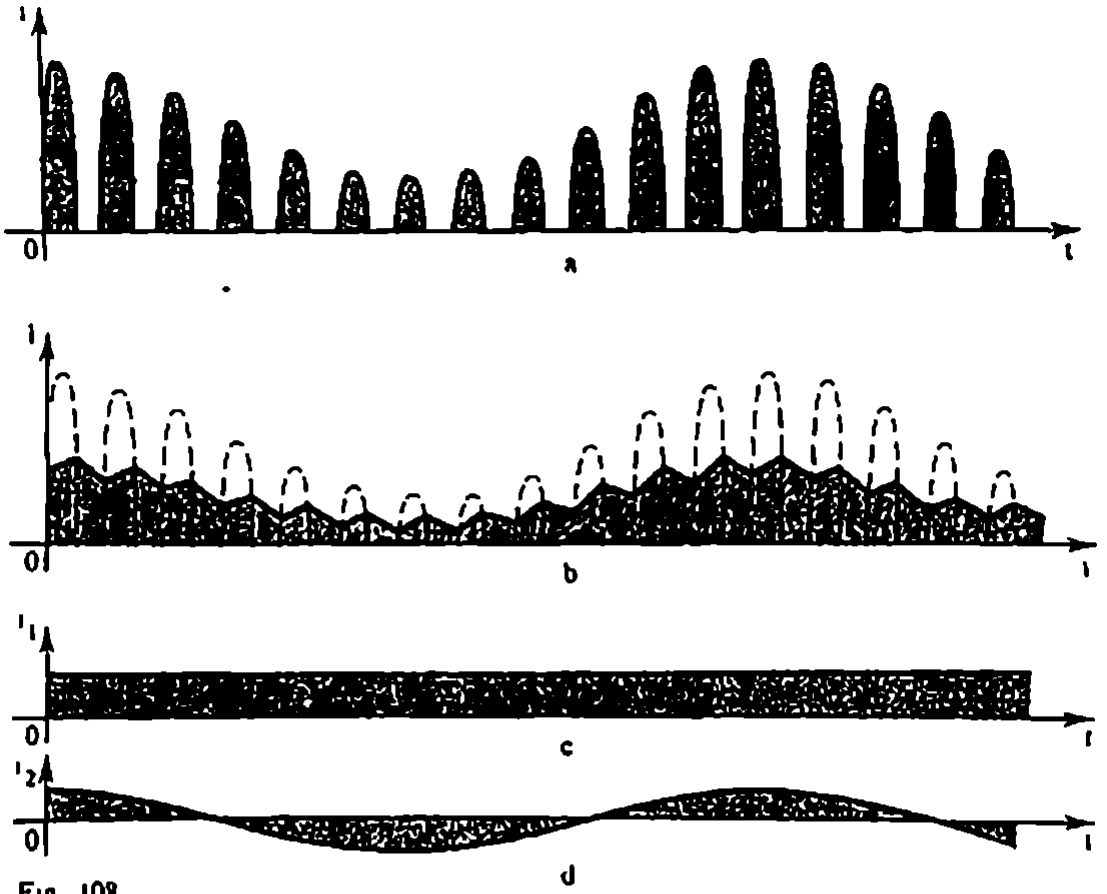


Fig. 108

Por el circuito representado en la fig. 106 pasará una corriente pulsatoria, cuya gráfica se muestra en la fig. 108 *a*. Esta corriente pulsatoria se atenúa por medio de un filtro. El filtro más simple es un condensador conectado en paralelo a la carga (fig. 109). El filtro funciona como sigue. En los instantes en que el diodo deja pasar la corriente, una parte de ésta pasa a través de la carga, mientras que la otra se deriva al condensador y lo carga (véanse las flechas de línea continua de la fig. 109). La derivación de la corriente hace que disminuyan los impulsos que pasan por la carga. En cambio, en el intervalo entre los impulsos, cuando el diodo está cerrado, el condensador se descarga parcialmente a través de la carga.

Por eso en el intervalo entre los impulsos la corriente pasa por la carga en

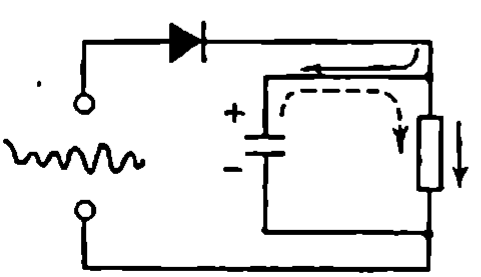


Fig. 109

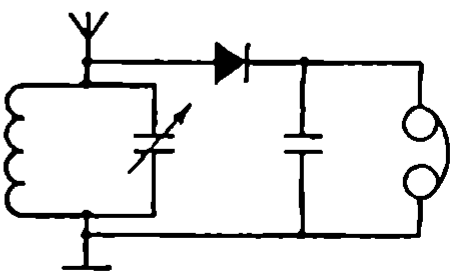


Fig. 110

este mismo sentido (vease la flecha de trazos en la fig. 109). Cada nuevo impulso recarga el condensador. Como resultado de esto a través de la carga pasa corriente de frecuencia sonora cuyas oscilaciones tienen una forma que casi reproduce la de la señal de baja frecuencia en la estación transmisora (véase la fig. 108, *b*). Esta corriente se puede considerar como la suma de una corriente continua (fig. 108, *c*) y de una corriente alterna de baja frecuencia (fig. 108, *d*)

Un simple receptor de galena consta de un circuito oscilante, acoplado a la antena, y de un circuito conectado al oscilante, formado por el detector y los auriculares (fig. 110). Las bobinas de los auriculares desempeñan el papel de carga. A través de ellas pasa corriente de frecuencia acústica. Las pequeñas pulsaciones de alta frecuencia no influyen apreciablemente en las oscilaciones de las membranas y no son percibidas por el oído

5.9 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Los aparatos radiotécnicos modernos dan la posibilidad de hacer experimentos muy intuitivos para observar las propiedades de las ondas electromagnéticas. Para esto conviene utilizar las ondas de la gama centimétrica. Estas ondas son emitidas por un generador de ultraalta frecuencia especial (UAF). Las oscilaciones de este generador se modulan con frecuencia acústica. La señal recibida, una vez detectada, se conduce a un altavoz.

Las ondas electromagnéticas se emiten a través de una antena de bocina (piramidal) en dirección del eje de ésta[1] La antena receptora, que es de la misma forma que la emisora, capta las ondas que se propagan a lo largo de su eje. La vista general de la instalación se muestra en la fig. 111.

ABSORCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Se colocan las bocinas una frente a otra y, una vez que se logra que el sonido se oiga bien en el altavoz, se interponen entre aquéllas distintos cuerpos dieléctricos, con esto se observa cómo disminuye la intensidad.

REFLEXIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Si el dieléctrico se sustituye por una placa metálica, el sonido deja de oirse. Las ondas no llegan al receptor a causa de la reflexión Ésta se produce bajo un ángulo igual al de incidencia, lo mismo que en el caso de las ondas mecánicas (véase el § 4.10). Para cerciorarse de esto las bocinas se disponen bajo ángulos iguales respecto de una chapa metálica grande (fig. 112). El sonido desaparece si se quita la chapa o si ésta se gira

REFRACCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS Las ondas electromagnéticas cambian de dirección (SE REFRACTAN) en los límites de un dieléctrico. Esto se pone de manifiesto valiéndose de un gran prisma triangular de parafina. Las bocinas se colocan formando cierto ángulo entre sí, lo mismo que al demostrar la reflexión. La chapa metálica se sustituye por el prisma (fig. 113). Quitando el prisma o haciéndolo girar se observa la desaparición del sonido

---

[1] Análogamente a como por medio del portavoz se crea el haz de ondas sonoras dirigidas (véase el § 4.10)

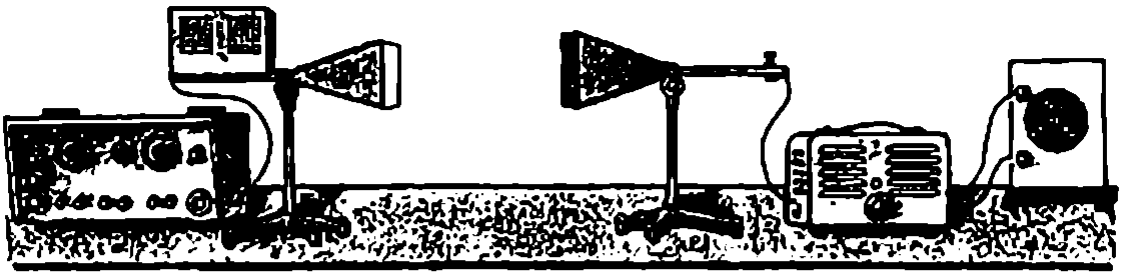


Fig. 111

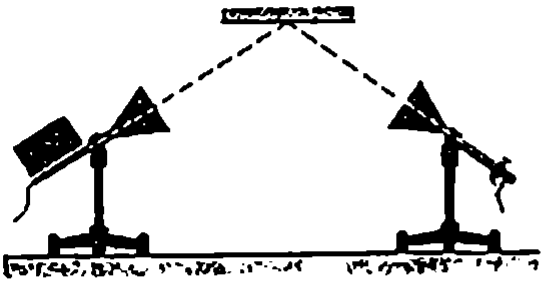


Fig. 112

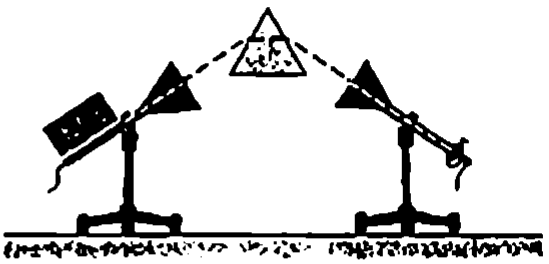


Fig. 113

CARÁCTER TRANSVERSAL DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Las ondas electromagnéticas son *transversales*. Esto significa que los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ del campo electromagnético de la onda son perpendiculares a la dirección de su propagación. Las oscilaciones de la intensidad del campo eléctrico de la onda que sale de la bocina llegan en un plano determinado, y las oscilaciones del vector inducción magnética, en un plano perpendicular a aquél. Las ondas con dirección de oscilación determinada se dice que están *polarizadas*. En la fig. 95 se representa precisamente una onda polarizada. La bocina receptora con detector sólo capta la onda polarizada en una dirección determinada.

Esto se puede poner de manifiesto girando 90° la bocina transmisora o la receptora. Al hacer esto el sonido desaparece.

La polarización se observa interponiendo entre el generador y el receptor una red de varillas metálicas paralelas (fig. 114). La red se coloca de tal modo que las varillas queden horizontales o verticales. En una de estas posiciones, cuando el vector eléctrico es paralelo a las varillas, se excitan en ellas corrientes, como resultado de lo cual la red refleja la onda como si fuera una placa metálica continua.

Cuando el vector $\vec{E}$ es perpendicular a las varillas, en éstas no se excitan corrientes y la onda electromagnética pasa.

INTERFERENCIA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS. En los experimentos con el generador de UAF también se puede observar un fenómeno ondulatorio tan importante como es la interferencia.

El generador y el receptor se colocan uno frente a otro (fig. 115). Después se acerca por abajo una placa metálica en posición horizontal. Elevando poco a poco la placa, se manifiestan sucediéndose unos a otros debilitamientos y reforzamientos del sonido.

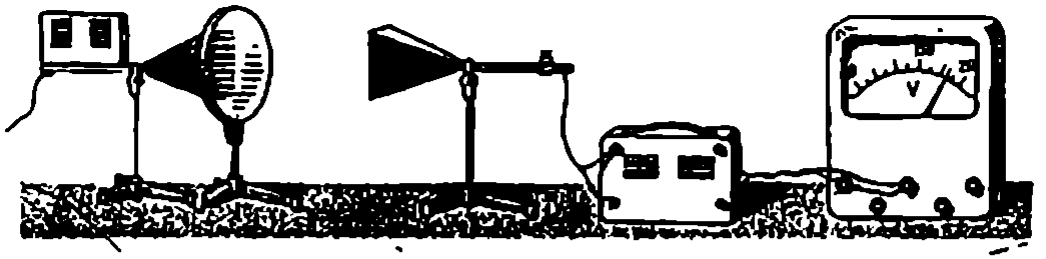


Fig. 114

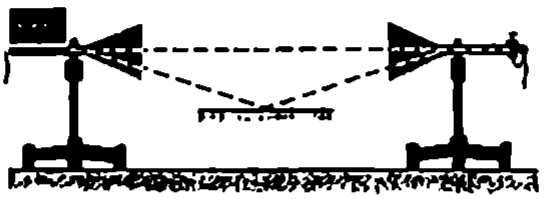


Fig. 115

Este fenómeno se explica como sigue Una parte de las ondas de la bocina del generador llegan directamente a la bocina receptora. Otra parte de ellas se refleja en la placa metálica Variando la posición de la placa se varía la diferencia de marcha de las ondas directa y reflejada En virtud de esto las ondas se refuerzan o se debilitan unas a otras, en dependencia de que dicha diferencia de marcha sea igual a un número entero de longitudes de onda o a un número impar de semilongitudes de onda.

También se puede observar la difracción de las ondas electromagnéticas

5.10. Propagación de las ondas hertzianas

Cuando las ondas electromagnéticas se emplean para la radiocomunicación, tanto la fuente como el receptor de las ondas hertzianas se encuentran por lo general cerca de la superficie terrestre. La forma y las propiedades físicas de esta superficie y el estado de la atmósfera influyen mucho en la propagación de las ondas radioeléctricas.

En especial ejerce una influencia importante sobre la propagación de las ondas hertzianas la capa de gas ionizado de las partes superiores de la atmósfera que se hallan a 100 .. 300 km sobre la superficie de la Tierra. Esta capa se llama *ionosfera*. La ionización del aire de las capas superiores de la atmósfera se debe a la radiación electromagnética del Sol y al flujo de partículas cargadas que él emite.

La ionosfera es conductora de la corriente eléctrica y REFLEJA las ondas hertzianas de longitud $\lambda > 10$ m como si fuera una placa metálica ordinaria. Pero la capacidad de la ionosfera para reflejar y absorber las ondas radioeléctricas varía considerablemente en dependencia de la hora de cada día y de la estación del año[1)]

La radiocomunicación estable entre puntos lejanos sobre la superficie de la Tierra, que no se encuentren en la línea de visibilidad geométrica, resulta

[1)] Por eso la comunicación por radio en la banda de longitudes de onda medias (desde 100 hasta 1000 m) es mucho más segura de noche y en invierno.

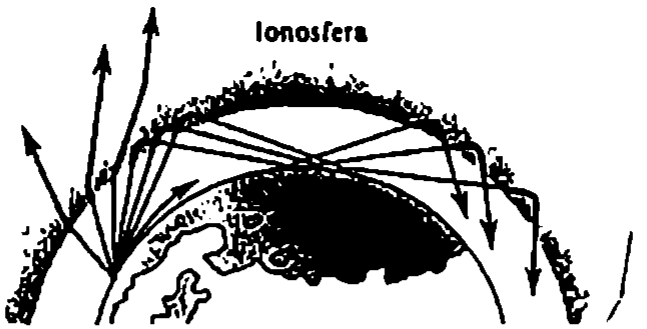


Fig. 116

posible gracias a la reflexión de las ondas en la ionosfera y a que las ondas hertzianas son capaces de rodear la superficie convexa de la Tierra (es decir, en virtud de la difracción). La difracción se manifiesta tanto más intensamente cuanto mayor es la longitud de onda. Por esta razón la radiocomunicación a grandes distancias, a expensas de que las ondas contornean la Tierra, se hace posible únicamente con longitudes de onda grandes, muy superiores a 100 m (*ondas medias* y *largas*).

Las *ondas cortas* (banda de longitudes de onda desde 10 hasta 100 m) se propagan a grandes distancias a costa solamente de reflejarse muchas veces en la ionosfera y en la superficie de la Tierra (fig. 116). Precisamente por medio de las ondas cortas se puede efectuar la comunicación por radio a cualquier distancia entre las estaciones emisoras de la Tierra.

Las ondas largas son menos aptas para este fin por ser absorbidas considerablemente tanto por las capas superficiales de la Tierra como por la ionosfera. No obstante, la comunicación por radio más segura a distancias limitadas, cuando la potencia de las emisoras es suficiente, se consigue con las ondas largas.

Las *ondas ultracortas* ($\lambda < 10$ m) atraviesan la ionosfera y casi no contornean la superficie de la Tierra. Por eso se utilizan para la comunicación entre puntos situados dentro de los límites de la visibilidad geométrica y también para la comunicación con las naves cósmicas.

5.11. Radiolocalización

En la técnica moderna el fenómeno de la reflexión de las ondas hertzianas por diversos obstáculos encuentra una amplia utilización. Receptores de alta sensibilidad captan y amplifican la señal reflejada con el fin de obtener información acerca de dónde se encuentra el objeto en que se refleja la onda.

El descubrimiento y la determinación exacta del punto en que se encuentra un objeto por medio de las ondas hertzianas se llama radiolocalización. La instalación para la radiolocalización, es decir, el *radiolocalizador* o *radar*[1], consta de una parte transmisora y de otra receptora. Para la radiolocalización

[1] Abreviación de "Radio Detection and Ranging", *detección y medición de distancias por radio*.

se utilizan oscilaciones eléctricas de frecuencia ultraalta (desde 10^8 hasta 10^{11} Hz). El potente generador de UAF está acoplado a una antena que emite una onda filiforme. En los radiolocalizadores que funcionan con longitud de onda del orden de 10 cm y menores, esta onda la crean antenas en forma de espejos parabólicos. Para las ondas de la gama de a metro, las antenas tienen la forma de complejos sistemas de osciladores. En este caso la radiación de haz filiforme se obtiene en virtud de la interferencia de las ondas. La antena se estructura de tal forma que las ondas emitidas por cada uno de los osciladores, al componerse, sólo se refuerzan unas a otras en la dirección preestablecida. En las demás direcciones se atenúan parcial o totalmente.

La onda reflejada la capta la misma antena emisora u otra antena receptora también de haz filiforme. La manifiesta direcividad de la radiación permite referirse al "rayo" del radiolocalizador. La dirección en que se encuentra el objeto se determina por la dirección del rayo en el instante en que se recibe la señal reflejada.

Para hallar la distancia hasta el objeto se utiliza el régimen de radiación por impulsos. El emisor irradia ondas a impulsos cortos. La duración de cada impulso es de millonésimas de segundo y los intervalos entre ellos son, aproximadamente, 1000 veces mayores. Durante las pausas se captan las ondas reflejadas.

La distancia R se determina midiendo el tiempo total t que tardan las ondas en recorrer el camino hasta el objeto y retornar. Como la velocidad de las ondas hertzianas $c = 3 \cdot 10^8$ m/s es prácticamente constante, resulta que

$$R = \frac{ct}{2}.$$

A causa de la dispersión de las ondas, hasta el receptor solo llega una parte insignificante de la energía que irradia el emisor. Por eso los receptores de radiolocalización amplifican la señal recibida billones (10^{12}) de veces. Este receptor tan sensible, por supuesto, debe estar desconectado en el instante en que el emisor lanza el impulso. No obstante, la potencia instantánea del emisor durante la radiación del impulso es tan grande (de decenas, centenares y hasta millares de kilovatios) que la influencia del dispositivo transmisor no se elimina totalmente. Para fijar las señales emitida y reflejada se utiliza un tubo de rayos catódicos. En el instante en que se emite el impulso, el punto brillante, que se mueve uniformemente por la pantalla del tubo, se desvía. En la pantalla se ve un pico junto al cero de la escala de distancias (fig. 117). El punto brillante continúa moviéndose uniformemente a lo largo de la pantalla y en el instante en

Fig. 117

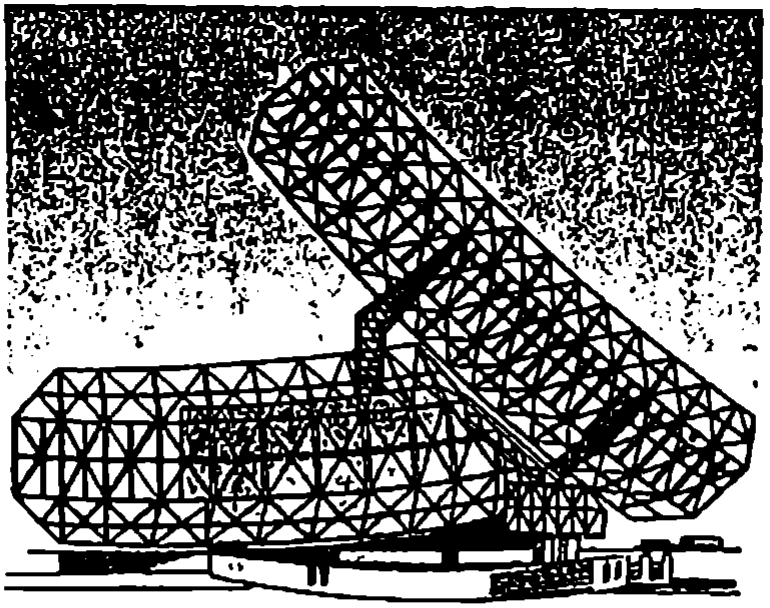


Fig. 118

que se recibe la débil señal reflejada, vuelve a desviarse. La distancia entre los picos en la pantalla es proporcional al tiempo t que tarda la señal en su recorrido y, por lo tanto, es proporcional a la distancia R hasta el objeto. Esto da la posibilidad de graduar la escala directamente en kilómetros.

Las instalaciones de radiolocalización descubren los buques y los aviones a distancias de hasta varios centenares de kilómetros. En su funcionamiento influyen poco las condiciones meteorológicas y la hora del día. En los grandes aeropuertos los localizadores vigilan los aviones que despegan y los que vienen a tomar tierra. El servicio de tierra del aeropuerto transmite por radio a los pilotos las instrucciones necesarias y de este modo garantiza la seguridad de los vuelos. El aspecto exterior de un localizador de aeropuerto puede verse en la fig. 118. Los buques y los aviones también se proveen de radiolocalizadores con fines propios de la navegación. Estos localizadores crean en la pantalla una figura con la disposición de los objetos dispersores de las ondas hertzianas. El operador tiene ante la vista el mapa por puntos (mapa radar) del lugar.

En la actualidad la radiolocalización se emplea con fines más diversos cada vez. Los localizadores sirven para observar los meteoros en las capas superiores de la atmósfera, para observar las nubes y predecir el tiempo y para investigaciones cósmicas. Cada nave cósmica tiene necesariamente a bordo varios localizadores. En 1946 en EE. UU. y Hungría se hizo un experimento de recepción de la señal reflejada en la superficie de la Luna. En 1961 un grupo de científicos soviéticos efectuó la radiolocalización del planeta Venus, lo que dio la posibilidad de hallar el período de rotación del planeta alrededor de su eje. En la actualidad se ha realizado ya la localización de otros planetas del sistema solar.

5.12. Idea de la televisión

Se encuentra en desarrollo impetuoso una rama relativamente nueva de la radioelectrónica, la *televisión*.

El principio en que se basa la transmisión de las imágenes a distancia

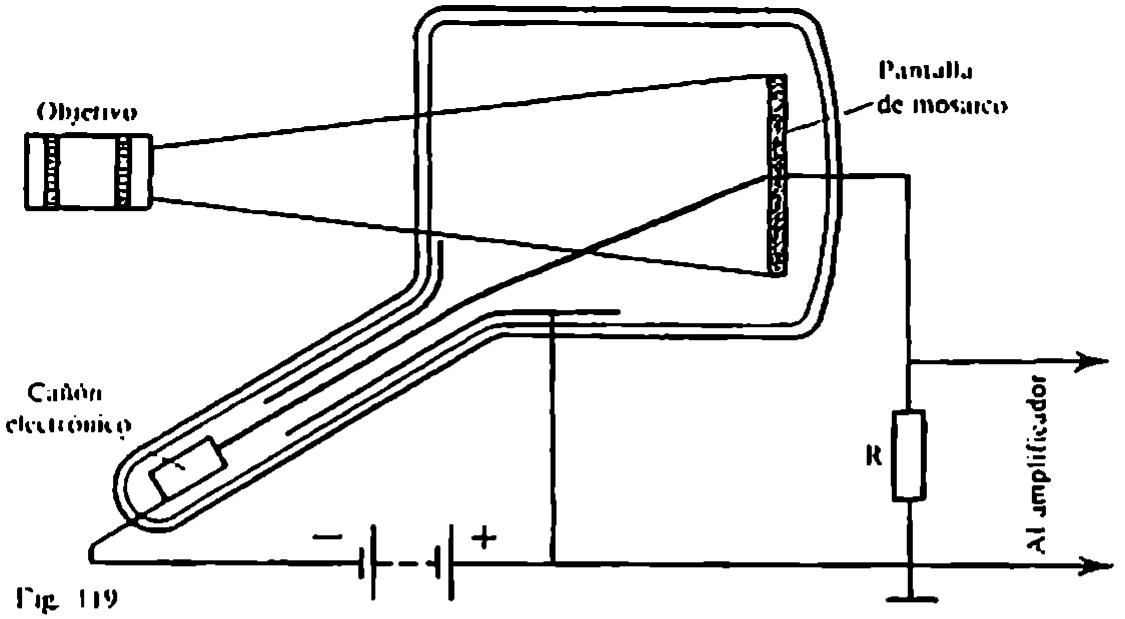


Fig. 119

consiste en lo siguiente. En la estación emisora se transforma la imagen en una sucesión de señales eléctricas. Estas señales modulan después las oscilaciones que produce un generador de alta frecuencia. La onda electromagnética modulada transporta la información a grandes distancias. En el receptor se efectúa la transformación inversa. Las oscilaciones de alta frecuencia moduladas se detectan y la señal que se obtiene se transforma en imagen visible. Para transmitir el movimiento se utiliza el principio del cinematógrafo: imágenes del objeto en movimiento, que se diferencian muy poco entre sí (fotogramas), se transmiten decenas de veces por segundo.

La transformación de la imagen de un fotograma en una serie de señales eléctricas se consigue por medio de un tubo catódico especial llamado *iconoscopio* (fig. 119). Dentro del iconoscopio hay una pantalla de mosaico sobre la cual se proyecta, por medio de un sistema óptico, la imagen del objeto. Cada una de las células del mosaico se carga de manera que su carga depende de la energía luminosa que incide sobre ella. Esta carga varía cuando sobre la célula incide el haz electrónico que crea el cañón de electrones. El haz electrónico va incidiendo paso a paso sobre todos los elementos, primero de una línea del mosaico, después de otra y así sucesivamente. De la intensidad con que varía la carga de la célula depende la intensidad de la corriente del impulso que pasa por la resistencia *R*. Por eso la tensión en la resistencia *R* varía proporcionalmente a la variación que experimenta la iluminación a lo largo de las líneas del cuadro.

Una señal de este tipo se obtiene en los receptores de televisión después de la detección. Ésta es la *señal de imagen* o *videoseñal*, la cual se transforma en imagen visible sobre la pantalla del tubo catódico receptor o *cinescopio*. El cañón electrónico de este tubo tiene un electrodo que regula el número de electrones que lleva el haz y, por consiguiente, la iluminación de la pantalla en el punto de incidencia de éste. Un sistema de bobinas de desviación horizontal y vertical obligan al haz electrónico a explorar o barrer toda la pantalla

exactamente del mismo modo que en el iconoscopio el haz electrónico explora la pantalla de mosaico. El movimiento sincrónico de los haces de los tubos transmisor y receptor se consigue emitiendo señales sincronizadoras especiales.

Las señales de televisión sólo se pueden transmitir en la gama de ondas ultracortas (métricas). Estas ondas sólo se propagan de ordinario dentro de los límites de la visibilidad geométrica de la antena. Por eso, para que la radiodifusión visual abarque un gran territorio es necesario situar los transmisores de televisión poco espaciados y elevar lo más posible sus antenas. La torre de televisión de Moscu tiene 540 m de altura y asegura la buena recepción en un radio de 120 km. Actualmente la red de televisión de la URSS cuenta con más de 3500 estaciones de televisión, cuyas emisiones son captadas por cerca de 100 millones de receptores (televisores). La zona de recepción segura de televisión crece continuamente, en particular, en virtud del empleo de los satélites retransmisores.

Cada vez se extiende más la televisión en color. Para obtener la imagen en color se transmiten tres videoseñales portadoras de los componentes de la imagen correspondientes a los colores fundamentales (rojo, verde y azul).

5.13. Desarrollo de los medios de comunicación en la URSS

En la Unión Soviética se está creando un sistema unificado de comunicación automatizada. Para eso se desarrollan, perfeccionan y encuentran continuamente nuevas áreas de aplicación los distintos medios técnicos de comunicación.

Hasta hace relativamente poco tiempo la comunicación telefónica interurbana se efectuaba exclusivamente por medio de líneas aéreas de telecomunicación, con lo que en la seguridad de la comunicación influían las tormentas y las posibles congelaciones de los conductores. Hoy se utilizan cada vez más las líneas de cable y de relés repetidores y se eleva el nivel de automatización de las comunicaciones.

Las líneas de relés repetidores de comunicación emplean ondas ultracortas (decimétricas y centimétricas). Estas ondas sólo se propagan dentro de los límites de la visibilidad geométrica. Por eso las líneas están formadas por cadenas de estaciones de radio poco potentes, cada una de las cuales transmite las señales que recibe a las estaciones más próximas, como si se tratara de una carrera de relevos. Estas estaciones tienen mástiles de 60 a 80 m de altura y se hallan de 40 a 60 km de distancia una de otra.

Los éxitos obtenidos en el campo de la radiocomunicación cósmica han permitido crear un nuevo sistema de comunicaciones, llamado "Órbita". En este sistema se utilizan satélites retransmisores (fig. 120). Los satélites se sitúan en órbitas muy alargadas. El período de rotación de estos satélites es de, aproximadamente, 12 h. Han sido creados sistemas potentes y seguros de teledifusión en las regiones de Siberia y del Extremo Oriente que permiten efectuar las comunicaciones telefono-telegráficas con las zonas más lejanas del país.

Se perfeccionan y encuentran nuevos empleos medios de comunicación relativamente anticuados, como el telégrafo y el fototelégrafo.

De la amplitud que ha alcanzado la transmisión de imágenes inmóviles por

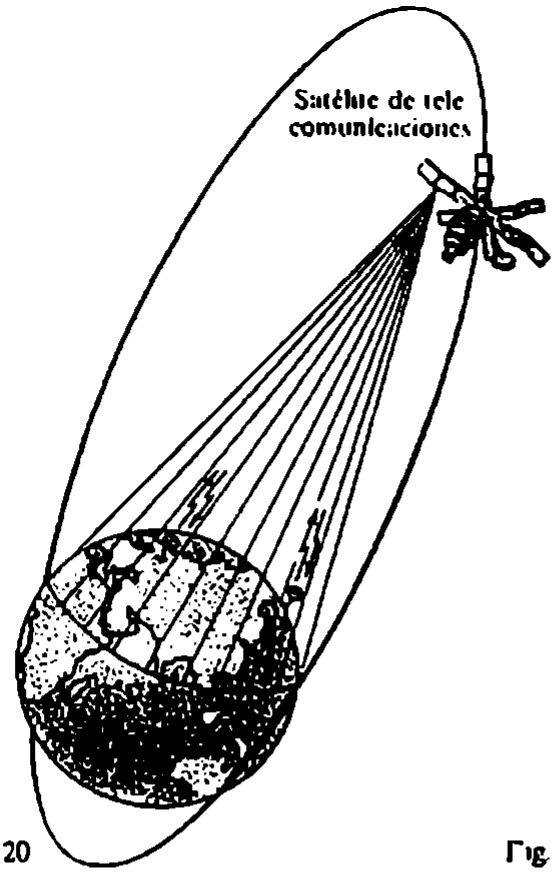


Fig. 120

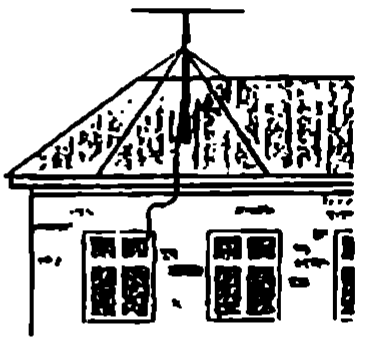


Fig. 121

fototelegrafo dan una idea las cifras siguientes. al año se transmiten por fototelégrafo hasta 70 mil planas de periódico, con las cuales se imprimen más de 3 mil millones de ejemplares de diarios centrales

¿ ?

1 ¿Para qué se emplea la modulación de amplitud de las señales de alta frecuencia?
2 ¿En qué consiste el proceso de detección de las señales moduladas de alta frecuencia?
3 Enumere las propiedades que conozca de las ondas electromagnéticas
4 ¿En qué principios se basa el funcionamiento del radar?

Ejercicio

1 ¿Se puede elegir un sistema de referencia en el cual la inducción magnética en el espacio, que rodea al conductor con corriente, sea nula?
2 Los osciladores emisor y receptor están dispuestos perpendicularmente entre sí. ¿Se producirán oscilaciones en el oscilador receptor?
3 En el esquema del receptor de radio representado en la fig. 110, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ H y la capacidad C del condensador variable puede cambiar desde 12 hasta 450 pF. ¿Para qué longitudes de onda está calculado este receptor?
4 La fig. 121 representa la antena receptora de un televisor ¿Qué puede decirse acerca de la orientación de las oscilaciones del vector inducción magnética de la onda que viene de la estación emisora?
5 ¿Existen diferencias esenciales entre las condiciones de propagación de las ondas hertzianas en la Luna y en la Tierra?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 5

Un campo magnético alternativo genera un campo eléctrico rotacional con líneas de intensidad cerradas. A esta conclusión llegó J.C. Maxwell al analizar el fenómeno de la inducción electromagnética. Más tarde supuso Maxwell que de un modo análogo el campo eléctrico alterno debe generar un campo magnético rotacional. En virtud de estos procesos las perturbaciones electromagnéticas se propagan con velocidad finita y existen las ondas electromagnéticas

En el campo electromagnético tienen lugar oscilaciones de la intensidad $\vec{E}$ del campo eléctrico y de la inducción magnética $\vec{B}$. Los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí y a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas electromagnéticas son transversales.

La radiación de las ondas electromagnéticas se origina cuando cargas electrónicas oscilan rápidamente. La energía emitida en la unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia. Las primeras ondas electromagnéticas las obtuvo H.R. Hertz. Basándose en los experimentos de Hertz, A.S. Popov inventó la radio.

La comunicación radiotelefónica se efectúa como sigue. Las oscilaciones de alta frecuencia que produce un generador se modulan con las oscilaciones de baja frecuencia (acústica). La antena de la estación transmisora emite una onda electromagnética modulada. En el receptor de radio las oscilaciones de alta frecuencia moduladas se transforman en oscilaciones de baja frecuencia. Este proceso recibe el nombre de detección.

Óptica

Introducción

(Desarrollo de las ideas acerca de la luz)

Las primeras opiniones de los sabios de la antigüedad acerca de lo que es la luz eran muy ingenuas Suponían que del ojo salen unos tentáculos sumamente delgados y que las sensaciones visuales se producen al ser tentados por ellos los objetos. Detenerse a tratar ahora detalladamente semejantes interpretaciones es inútil Nos limitaremos a seguir sucintamente el desarrollo de las ideas científicas sobre lo que es la luz.

DOS PROCEDIMIENTOS DE TRANSMISION DE LAS ACCIONES. De un foco de luz, por ejemplo, de una lámpara, la luz se propaga en todas las direcciones e incide sobre los objetos que hay alrededor provocando en particular, su calentamiento. Cuando llega al ojo, la luz produce la sensación visual, es decir, vemos. Puede decirse que al propagarse la luz tiene lugar la transmisión de la acción de un cuerpo (foco) a otro (receptor).

Pero, en general, la acción de un cuerpo sobre otro se puede efectuar de dos modos distintos. por medio de un TRANSPORTE DE SUSTANCIA del foco al receptor, o mediante la VARIACIÓN DEL ESTADO DEL MEDIO que hay entre los cuerpos (sin transporte de sustancia).

Por ejemplo, se puede hacer sonar una campanilla que se encuentre a cierta distancia tirándole una bolita (fig. 122, *a*). En este caso tenemos un transporte de sustancia Tambien se puede proceder de otra manera: se ata una cuerda al badajo de la campanilla y se la hace sonar enviando por dicha cuerda ondas que muevan el badajo (fig. 122, *b*). Aquí no existe transporte de sustancia. Por la cuerda se propaga una onda, es decir, se produce una variación del estado (forma) de la cuerda.

Por lo tanto, la transmisión de la acción de un cuerpo a otro se puede efectuar por medio de ondas.

TEORÍAS CORPUSCULAR Y ONDULATORIA DE LA LUZ De acuerdo con las dos formas posibles de transmisión de la acción del foco al receptor surgieron y comenzaron a desarrollarse dos teorías totalmente distintas acerca de lo qué es la luz y de cuál es su naturaleza. Ambas teorías aparecieron casi al mismo tiempo en el siglo XVII

La primera de estas teorías va ligada al nombre de Newton y la segunda al de Huygens.

Newton mantenía la denominada *teoría corpuscular*[1] *de la luz*, según la cual *ésta es un flujo de partículas* que salen del foco en todas las direcciones (transporte de sustancia).

Huygens consideraba que *la luz . s ondas* que se propagan en un medio

[1] Del latín "*corpusculum*", cuerpecillo, partícula.

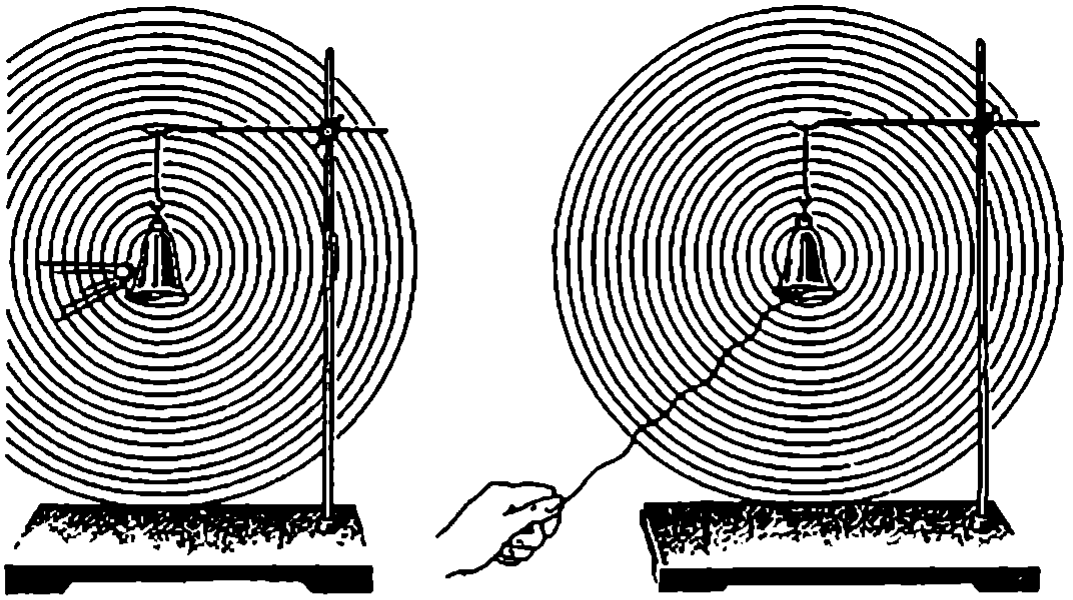


Fig. 122

hipotético, el éter, el cual ocupa todo el espacio y penetra dentro de todos los cuerpos

Las dos teorías existieron paralelamente durante mucho tiempo. Ninguna de ellas podía lograr la victoria definitiva. La autoridad de Newton hacía, sin embargo, que la mayoría de los científicos dieran preferencia a la teoría corpuscular. Las leyes de la propagación conocidas hasta entonces podían ser explicadas más o menos satisfactoriamente por ambas teorías

Basándose en la teoría corpuscular era difícil explicar por qué los haces luminosos al cruzarse en el espacio no influyen uno en otro, ya que las partículas luminosas deben chocar y dispersarse

La teoría ondulatoria, en cambio, explicaba esto fácilmente. Las ondas de la superficie del agua, por ejemplo, pasan libremente una a través de otra sin ejercer influencia mutua

Pero la propagación rectilínea de la luz, que hace que detrás de los objetos se formen sombras bien marcadas, es difícil de explicar partiendo de la teoría ondulatoria. Por la teoría corpuscular, en cambio, la propagación rectilínea de la luz es simplemente consecuencia de la ley de la inercia.

Esta situación indeterminada concerniente a la naturaleza de la luz duró hasta principios del siglo XIX, cuando fueron descubiertos los fenómenos de la difracción (rodeo de los objetos por la luz) y de la interferencia de la luz (reforzamiento o debilitamiento de la iluminación cuando se superponen entre sí haces luminosos). Estos fenómenos son propios exclusivamente del movimiento ondulatorio. Explicarlos por medio de la teoría corpuscular es imposible. Al parecer, la teoría ondulatoria había logrado vencer total y definitivamente

Semejante seguridad se reforzó particularmente cuando Maxwell, en la segunda mitad del siglo XIX, demostró que la luz es un caso particular de las

ondas electromagnéticas Los trabajos de Maxwell sentaron los cimientos de la *teoría electromagnética de la luz.*

Una vez que Hertz descubrió experimentalmente las ondas electromagneticas no quedó duda alguna de que la luz, al propagarse, se comporta como una onda. De esto tampoco duda nadie ahora.

Sin embargo, a principios del siglo XX las ideas acerca de la naturaleza de la luz empezaron a cambiar radicalmente. Se reconoció que la desechada teoría corpuscular tiene, a pesar de todo, ligazón con la realidad.

La luz, al ser irradiada y absorbida, se comporta como un flujo de partículas

Se descubrió que la luz tiene propiedades discontinuas o, como suele decirse, cuánticas Se creó una situación insólita: los fenómenos de interferencia y difracción se podían explicar como antes, considerando la luz como una onda, y los fenómenos de emisión y absorción, estimándola como un flujo de partículas. Estos dos criterios sobre la naturaleza de la luz, que parecían incompatibles, en los años 30 del siglo XX se consiguieron aunar de forma no contradictoria en una nueva teoría física, la *electrodinámica cuántica*

Más tarde se ha podido establecer que la dualidad de propiedades es característica no sólo de la luz, sino de cualquier otra forma de la materia.

Las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz se darán a conocer más adelante. Pero previamente vamos a estudiar las leyes de la propagación de la luz que constituyen el contenido de la llamada óptica *geométrica* o *de los rayos luminosos*

6 ÓPTICA GEOMÉTRICA

6.1. Propagación rectilínea de la luz

RAYOS LUMINOSOS. La dirección en que se propaga cualquier onda, incluida la luminosa, se determina por medio de los *rayos* o líneas perpendiculares a las superficies de onda (véase el § 4.4) que indican la dirección en que se propaga la energía de la onda. La dirección de un haz de rayos luminosos se puede hallar experimentalmente si en el camino de la luz se interpone una pantalla opaca con un orificio (fig. 123). Entonces, si en la habitación hay algo de humo, se ve el camino que sigue la luz en forma de un estrecho canal rectilíneo, es decir, de *haz luminoso*.

Podría pensarse que disminuyendo el orificio se puede estrechar el haz hasta convertirlo en una línea y, de este modo, establecer con tanta exactitud como se quiera la dirección en que se propaga la luz. Pero en realidad, al achicar el orificio el haz sólo se comprime mientras el diámetro de aquél sigue siendo mucho mayor que la longitud de la onda luminosa. Cuando el diámetro del orificio en orden de magnitud se vuelve comparable con la longitud de onda, comenzará a apreciarse el ensanchamiento del haz debido a la difracción. La luz rodea el borde de la pantalla de un modo semejante a como lo hacen las ondas de la superficie del agua (véase la fig. 88). Por eso es imposible obtener un haz de luz tan delgado como se desee, que pudiera llamarse rayo luminoso.

Se entiende por rayo de luz no un haz luminoso estrecho, sino la línea que indica la dirección en que se propaga la energía luminosa. Para determinar esta dirección se aíslan haces luminosos estrechos cuyo diámetro en todo caso debe ser mayor que la longitud de onda. Luego se sustituyen estos haces por líneas que son algo así como los ejes de dichos haces. Estas líneas representan los rayos de luz. Por consiguiente, cuando se habla de reflexión o refracción de los rayos luminosos se sobrentiende que se trata del cambio de la dirección en que se propaga la luz.

La ventaja fundamental que se obtiene de la introducción del concepto de rayo luminoso consiste en que el comportamiento de los rayos en el espacio está determinado por leyes simples, conocidas con el nombre de *leyes de la óptica geométrica*.

Se llama óptica geométrica la parte de la óptica que estudia las leyes de la propagación de la energía luminosa en los medios transparentes, basándose en el concepto de rayo luminoso.

Estas leyes fueron establecidas empíricamente mucho antes de que se aclarara la naturaleza de la luz. Pero se infieren de la teoría ondulatoria de la luz como aproximación válida, si la longitud de onda es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos y éstos se encuentran no muy lejos del punto de observación.

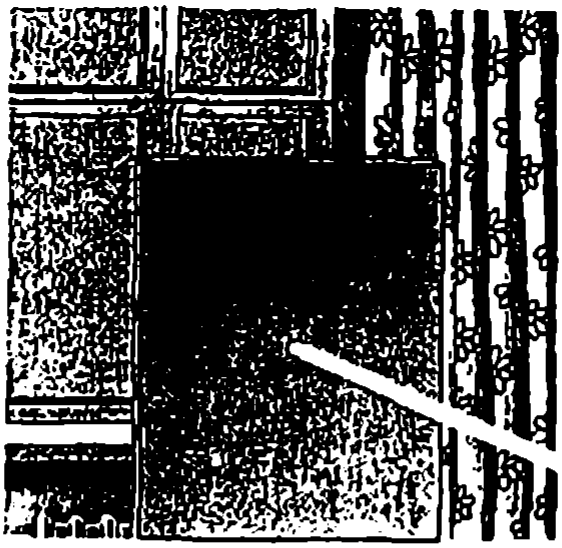


Fig. 123

En este capítulo se darán a conocer las leyes de la óptica geométrica y sus múltiples aplicaciones para el cálculo de aparatos ópticos: lentes, cámaras fotográficas, microscopios, etc.

LEY DE LA PROPAGACIÓN RECTILÍNEA DE LA LUZ. Como demuestran las observaciones, en un medio homogéneo la luz se propaga en línea recta. En otras palabras, en un medio homogéneo los rayos luminosos son líneas rectas[1].

Para demostrar esto tracemos, valiéndonos de una regla, un segmento de recta en una hoja de papel, de cartón o en una tabla. Hincuemos un alfiler en cada extremo del segmento y otro en su centro y miremos a lo largo de la línea trazada. Si la línea es realmente recta, el alfiler más próximo tapará a los otros. Esto significa que los rayos luminosos, que van a lo largo de la recta desde el alfiler más lejano como de una fuente de luz, no llegan a nuestro ojo porque en su camino encuentran un obstáculo opaco. Por lo tanto, mirando a lo largo de una línea trazada se puede comprobar de este modo si es recta o no.

Por la propagación rectilínea de la luz se explica la formación de la *sombra*, es decir, de la región en que no penetra la energía luminosa. Si las dimensiones del foco son pequeñas (punto luminoso) se obtiene una sombra nítida (fig. 124). Pero si las dimensiones del foco son grandes las sombras que se crean no están bien definidas (fig. 125). Esto se debe a que desde cada punto del foco la luz se propaga rectilíneamente y el objeto, iluminado ya por dos puntos, da dos sombras no coincidentes que superpuestas forman una sombra cuya densidad no es uniforme. La sombra total, cuando el foco es extenso, sólo se forma en aquellas partes de la pantalla a las cuales la luz no llega en absoluto. Rodeando la sombra total se encuentra una región más clara, la penumbra. A medida que se aleja de la zona de sombra total, la penumbra se va haciendo cada vez más clara. Desde la zona de sombra total el ojo no ve el foco luminoso, y desde la región de penumbra sólo se divisa una parte de su superficie (fig. 126).

[1] En geometría el término *rayo*, lo mismo que el concepto de *línea recta*, apareció basándose en la idea de los rayos de luz.

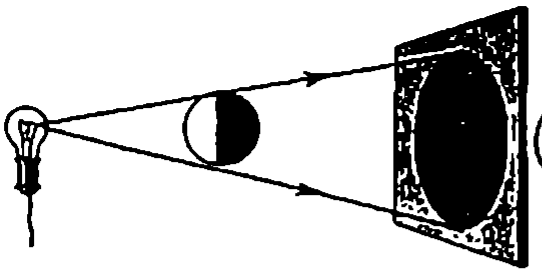


Fig. 124

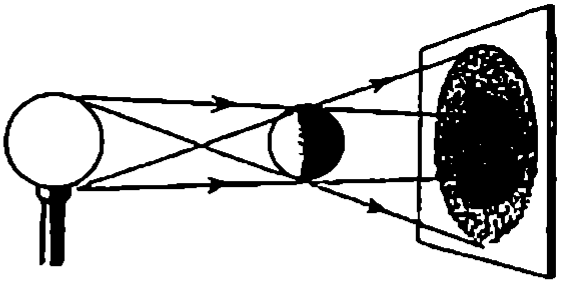


Fig. 125

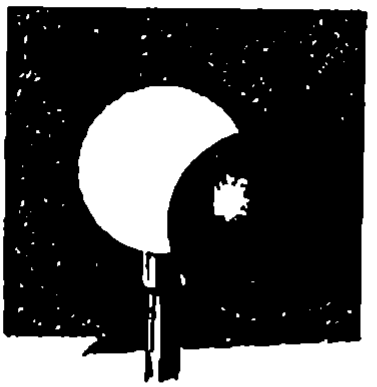


Fig. 126

En muchos casos la sombra no se crea en absoluto. Así, un día nublado no se ve la sombra de los postes, casas y demás objetos Durante las operaciones quirúrgicas el campo operatorio se ilumina con lámparas especiales que no dan sombra.

6.2. Fotometría . Flujo luminoso. Intensidad de la luz

La luz ejerce influencia sobre los cuerpos porque transporta energía Según la teoría de Maxwell la energía luminosa es la energía de las ondas electromagnéticas. Los métodos de medición de la energía luminosa constituyen la parte de la óptica denominada *fotometría*

Una serie de magnitudes caracterizan la luz desde el punto de vista de la energía que transporta. La más importante de estas magnitudes es el *flujo luminoso* Para percibir la energía luminosa tiene especial importancia, como es natural, el ojo humano Por eso en primer lugar nos interesa no la energía total transportada por las ondas electromagnéticas, sino únicamente la parte de ella a la que reacciona el ojo Las ondas electromagnéticas muy largas (hertzianas) y las muy cortas (como los rayos γ, de los que ya se habló en "Física I") no son percibidas por el ojo

FLUJO LUMINOSO El ojo humano tiene la máxima sensibilidad a los rayos verdes Por eso en la práctica lo más importante es conocer no simplemente la cantidad de energía luminosa que registran los instrumentos de medida, sino la magnitud que caracteriza la acción de la luz sobre el ojo Esta magnitud es el *flujo luminoso* (que se simboliza con la letra Φ)

Se llama flujo luminoso la energía de la luz que pasa a través de cierta superficie en la unidad de tiempo, valorada por la sensación visual

En otras palabras, el flujo luminoso es la potencia de radiación luminosa apreciada directamente por el ojo humano.

El flujo luminoso lo crea el foco de luz y actúa sobre los objetos circundantes Respectivamente se introducen otras dos magnitudes energéticas· una para caracterizar la fuente o foco de luz, que recibe el nombre de *intensidad de la luz* del foco, y otra para caracterizar la acción de la luz sobre la superficie de los cuerpos, llamada *iluminación* (o *iluminancia*).

El concepto de intensidad de la luz es más fácil de introducir refiriéndolo a la denominada *fuente* o *foco puntual de luz.*

FUENTE PUNTUAL Un foco de luz se considera *puntual* si sus dimensiones son mucho menores que las distancias desde las cuales se aprecia su acción. Se supone además que esta fuente emite la luz uniformemente en todas las direcciones. Así, por ejemplo, las distancias hasta las estrellas superan tanto las dimensiones de éstas que precisamente las estrellas son el mejor modelo de fuente puntual, a pesar de que sus dimensiones son enormes. Introduciendo el concepto de fuente o foco puntual de luz, sólo destacamos aquellas propiedades de las fuentes reales que son esenciales para la fotometría, prescindiendo de las propiedades secundarias. La fuente puntual es una idealización como otros modelos adoptados por la física, por ejemplo, el punto material, el cuerpo rígido o indeformable, el gas perfecto, etc

ÁNGULO SÓLIDO Para definir la distribución del flujo luminoso emitido por un foco de luz en distintas direcciones se utiliza el concepto de *ángulo sólido*

Consideremos una esfera de radio R. Imaginemos dentro de esa esfera un cono cuyo vértice se encuentre en el centro de aquélla (fig. 127). Este cono cortará en la esfera cierta parte de superficie de área S.

La región del espacio limitada por la superficie del cono se llama ángulo sólido. El ángulo sólido Ω se mide por la razón del área S, antes indicada, al cuadrado del radio R de la esfera:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \qquad (6.1)$$

Es fácil comprender que el valor del ángulo sólido no depende del radio de la esfera, ya que la parte S de superficie que aquél corta es proporcional al cuadrado del radio. La unidad de ángulo sólido es el estercorradián (1 sr). La superficie cónica que limita el ángulo sólido de 1 sr corta en la esfera una parte de su superficie cuya área es igual al cuadrado del radio de la esfera. El ángulo sólido

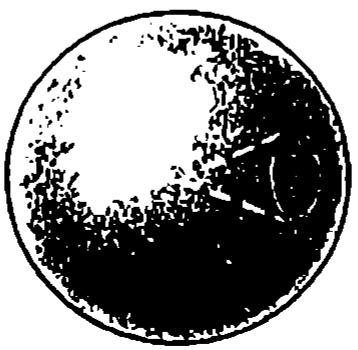


Fig. 127

total, que abarca todo el espacio alrededor de un punto, es

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ sr.} \tag{6.2}$$

INTENSIDAD DE LA LUZ. *Se da el nombre de intensidad I de la luz de un foco o fuente a la razón del flujo luminoso Φ al valor Ω del ángulo sólido en el cual este flujo ha sido creado por la fuente:*

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \tag{6.3}$$

Como el ángulo sólido total es igual a 4π sr, la intensidad de la luz de un foco puntual se expresa así:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \tag{6.4}$$

donde Φ es el flujo luminoso total de la fuente, es decir, la potencia de la radiación luminosa que se propaga en todas las direcciones desde el foco, apreciada por la sensación visual que produce.

En el sistema internacional de unidades (SI) se toma como unidad fundamental de las magnitudes fotométricas la unidad de intensidad de la luz, llamada candela (cd). Esto se explica porque el patrón más fácil de crear es precisamente el de la intensidad de la luz. De patrón de unidad de intensidad de la luz (1 cd) sirve una fuente especial. Todas las demás unidades fotométricas, incluso la de flujo luminoso, son derivadas

UNIDAD DE FLUJO LUMINOSO Como unidad de flujo luminoso se toma el lumen (lm); *1 lm es el flujo luminoso que emite una fuente puntual de 1 cd de intensidad en un ángulo sólido igual a 1 sr.*

6.3. Iluminación

Una fuente de luz casi siempre ilumina la superficie de los objetos desigualmente Así, una lámpara suspendida sobre una mesa ilumina mejor el centro de ésta Los bordes de la mesa están mucho menos iluminados. Esto no sólo se debe a que la intensidad de la luz de la lámpara eléctrica sea distinta en diferentes direcciones. Incluso en el caso de un foco puntual corresponderá a la superficie del centro de la mesa más potencia luminosa (flujo luminoso) que a una superficie igual en el borde

Se llama iluminación (o iluminancia) E, la razón del flujo luminoso Φ, que incide sobre una superficie determinada, al área S de dicha superficie

$$E = \frac{\Phi}{S} \tag{6.5}$$

Como unidad de iluminación se toma el lux (lx); *1 lx es la iluminación con la cual sobre 1 m² de superficie se distribuye uniformemente un flujo luminoso de 1 lm*

Para los cálculos fotométricos tiene importancia conocer cómo depende la iluminación E de una superficie cualquiera de su posición respecto de los rayos incidentes, de la distancia R hasta la fuente de luz y de la intensidad I de la luz de dicha fuente.

Es evidente que, en igualdad de las demás condiciones, la iluminación es directamente proporcional a la intensidad de la luz de la fuente. En efecto, dos focos iguales juntos emitirán en una dirección dada doble energía luminosa en la unidad de tiempo que un solo foco. Pero estos dos focos se pueden sustituir por uno cuya intensidad de luz sea dos veces mayor.

La dependencia de la iluminación respecto de la distancia a la fuente se puede determinar colocando mentalmente una fuente puntual en el centro de una esfera. El área de la esfera $S = 4\pi R^2$, y el flujo luminoso total $\Phi = 4\pi I$ (véase la fórmula 64). Por lo tanto, la iluminación se expresa así:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}$$

Es decir, la iluminación de una superficie es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a la fuente.

En el caso que hemos considerado los rayos incidirán sobre la superficie de la esfera perpendicularmente. Pero no siempre ocurre así. La dirección de los rayos que inciden sobre una superficie se caracteriza por el *ángulo de incidencia*.

Se llama ángulo de incidencia el ángulo α entre el rayo incidente y la perpendicular levantada a la superficie en el punto de incidencia del rayo (fig. 128).

El ángulo de incidencia de los rayos de un foco situado en el centro de una esfera, sobre la superficie de ésta, es nulo.

Veamos ahora cómo varía la iluminación de una superficie cualquiera si, siendo igual la distancia de ella a la fuente, el ángulo de incidencia de los rayos es distinto de cero. Para esto consideremos una porción muy pequeña de la superficie interna de la misma esfera que antes. Si las dimensiones de esta porción de superficie son mucho menores que el radio de la esfera, se podrá considerar plana, y los rayos que sobre ella inciden, como si fueran, aproximadamente, paralelos. Supongamos que el área de esta porción es ΔS_0 (fig. 129). Consideremos otra superficie sobre la cual incida desde el mismo foco un flujo luminoso igual al primero. Si esta segunda superficie forma con la primera el ángulo α, el ángulo de incidencia sobre ella de los rayos del foco

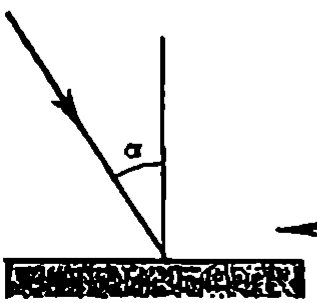


Fig. 128

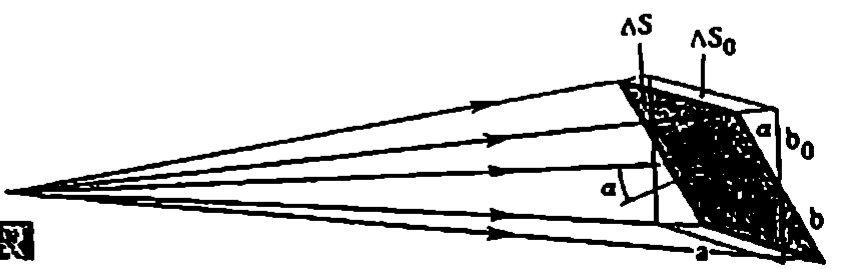


Fig. 129

central también será igual a α. El área de la segunda superficie es ΔS. Como puede verse fácilmente por la figura, ambas superficies tienen la misma anchura a, pero distintas longitudes b y b_0, siendo

$$\frac{b_0}{b} = \cos\alpha$$

Por eso

$$\frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \frac{ab_0}{ab} = \cos\alpha$$

Siendo igual el flujo luminoso $\Delta\Phi$, la iluminación de ambas superficies no será la misma:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad E_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S_0}.$$

Por consiguiente,

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos\alpha.$$

Así, pues, entre la iluminación E de la superficie inclinada y la iluminación E_0 de la superficie perpendicular a los rayos existe la relación

$$E = E_0 \cos\alpha. \tag{6.6}$$

Esto significa que la iluminación de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos.

Uniendo los resultados obtenidos se puede enunciar la ley general de la iluminación.

La iluminación de una superficie, creada por un foco puntual de luz, es directamente proporcional a la intensidad de la luz del foco y al coseno del ángulo de incidencia de los rayos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del foco a la superficie:

$$E = \frac{I}{R^2}\cos\alpha. \tag{6.7}$$

Si los focos son varios, la iluminación total será igual a la suma de las iluminaciones creadas por cada uno de ellos separadamente.

Para medir la iluminación se utilizan aparatos especiales, los *luminímetros o luxímetros*. La acción del instrumento que emplean los fotógrafos para determinar el tiempo de exposición –*exposímetro fotoeléctrico*– también se basa en medir la iluminación.

Con el fin de conservar la vista normal de todos los ciudadanos, en la URSS existen normas higiénicas de iluminación de los domicilios y locales de trabajo que garantizan las condiciones óptimas de trabajo y de vida. Así, la iluminación del encerado de una clase debe ser igual a 150 lx, y el de las escaleras de una escuela, de 30 lx.

¿?

1. ¿A qué se llama rayo luminoso?
2. ¿A qué se da el nombre de flujo luminoso?
3. ¿Qué es un ángulo sólido?
4. ¿A qué se llama intensidad de la luz?
5. ¿De qué depende la iluminación de una superficie, creada por una fuente puntual de luz?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1 La sombra de un edificio iluminado por rayos solares tiene la longitud $L = 36$ m. Una pértiga vertical, cuya altura $h = 2{,}5$ m, proyecta una sobra de longitud $l = 3$ m. Hallar la altura H del edificio.

Solución. Los rayos solares inciden sobre la superficie horizontal de la Tierra formando un ángulo α (fig. 130). Por el dibujo se ve que

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{L}{H} \qquad \text{y} \qquad \operatorname{tg}\alpha = \frac{l}{h}$$

Por consiguiente,

$$\frac{L}{H} = \frac{l}{h}.$$

De donde

$$H = \frac{L}{l}h = 30 \text{ m}.$$

PROBLEMA 2 Una mesa redonda se ilumina con una lámpara (sin pantalla) suspendida sobre el centro de aquélla a la altura $h = 1{,}2$ m (fig. 131). El diámetro de la mesa $D = 1{,}2$ m. ¿A qué será igual la iluminación en el punto A del borde de la mesa, si el flujo luminoso total de la lámpara $\Phi_0 = 750$ lm?

Solución. La iluminación en el punto A se calcula por la fórmula

$$E = \frac{I}{R^2}\cos\alpha$$

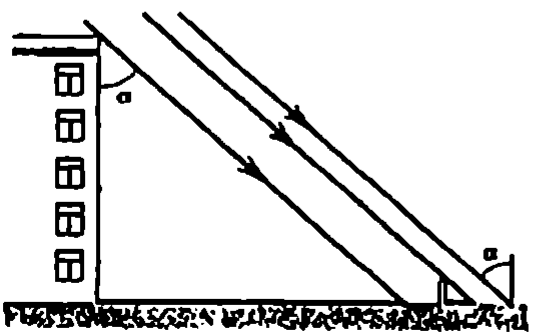


Fig. 130

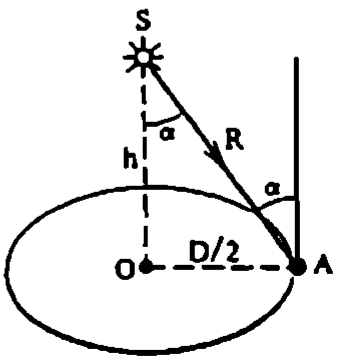


Fig. 131

La intensidad de la luz I se puede hallar por la fórmula

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi}.$$

En el triángulo rectángulo SOA

$$R^2 = h^2 + \frac{D^2}{4}, \quad \cos\alpha = \frac{h}{R} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}}}.$$

Por lo tanto,

$$E = \frac{\Phi_0 h}{4\pi\left(h^2 + \frac{D^2}{4}\right)^{3/2}} \approx 30 \text{ lx}$$

Ejercicio 6

1. Un haz de luz penetra en una caja por un orificio practicado en una de sus paredes laterales y sale por el orificio que hay en la pared opuesta. Si dentro de la caja el aire está limpio, ¿se verá el haz luminoso al mirar el interior de la caja por un orificio de su pared frontal?
2. ¿Cómo ve el observador un eclipse de Sol cuando la Tierra se encuentra en la región de penumbra de la Luna?
3. "En la habitación a que entró Iván Ivánovich reinaba la más completa oscuridad, porque los postigos de las ventanas estaban cerrados, y un rayo de luz, que pasaba por el agujero que había en uno de ellos, se irisaba y, al chocar con la pared opuesta, proyectaba en ella un panorama variopinto de tejados, árboles y ropa tendida en la calle, aunque todo patas arriba" (*N. V Gógol*, "Historia de la querella de Iván Ivánovich con Iván Nikíforovich") Explique el origen de este fenómeno
4. ¿Por qué la sombra de los pies, proyectada sobre el suelo por la luz de un farol, es más nítida que la sombra de la cabeza?
5. La lámpara suspendida sobre una máquina herramienta a 1,1 m de altura crea en el lugar de trabajo una iluminación de 50 lx. Según las normas vigentes la iluminación no debe diferir de 50 lx en más de 10 lx en uno u otro sentido. ¿A qué altura sobre la máquina se puede encontrar la lámpara?
6. Dos focos puntuales de luz, cuyas intensidades son $I_1 = 80$ cd e $I_2 = 125$ cd, se encuentran a la distancia $l = 3{,}6$ m uno de otro ¿En qué punto de la recta que une dichos focos hay que colocar una pequeña pantalla plana para que su iluminación sea igual por ambos lados? ¿Variará esta respuesta si la pantalla no es perpendicular a la recta que une los focos?
7. Una habitación se alumbra con dos lámparas colgadas a la altura $h = 3$ m del suelo y a la distancia $l = 4$ m una de otra Considerando las lámparas como focos puntuales de intensidad de luz $I = 200$ cd cada uno, determinar la iluminación del suelo debajo de cada lámpara y a media distancia entre ellas La influencia que sobre la iluminación ejerce la luz reflejada en el techo y en las paredes no tomarla en consideración

---

6.4. Ley de la reflexión de la luz. Construcción de la imagen en un espejo plano

Un rayo de luz en un medio homogeneo es rectilineo hasta que llegue al limite de este medio con otro. En el limite entre dos medios el rayo cambia de dirección Una parte de la luz (en una serie de casos toda ella) retorna al primer medio. Este fenómeno se conoce con el nombre de *reflexión de la luz*. Al mismo tiempo la luz pasa parcialmente al segundo medio, cambiando al hacerlo la dirección de su propagación, es decir, *se refracta*.

REFLEXION ESPECULAR Y REFLEXIÓN DIFUSA En dependencia de las propiedades del limite de seperacion entre los dos medios, la reflexión puede tener distinto carácter. Si este limite tiene la forma de superficie cuyas rugosidades son de dimensiones menores que la longitud de la onda luminosa, se dice que es *especular*.

De ejemplos de superficies que por sus propiedades se aproximan a los espejos pueden servir la superficie de una gota de mercurio, la superficie de un vidrio liso o una superficie metálica bien pulimentada. Los rayos de luz que inciden sobre una de estas superficies formando un estrecho haz paralelo, después de reflejarse siguen también direcciones próximas Esta reflexión dirigida se llama *especular*

Si, en cambio, las dimensiones de las rugosidades son mayores que la longitud de onda de la luz, el haz estrecho se dispersa en el limite. Una vez reflejados, los rayos de luz siguen todas las direcciones posibles. Esta reflexión recibe el nombre de *difusa* o *irregular*. Precisamente en virtud de la reflexión difusa de la luz podemos ver los objetos que de por si no emiten luz. En pequeño grado la difusión de la luz tiene lugar incluso cuando la reflexión se produce en la superficie más lisa, por ejemplo, en un espejo ordinario. De lo contrario no podriamos ver la superficie del espejo.

LEY DE LA REFLEXIÓN DE LA LUZ. Esta ley define las posiciones mutuas del rayo incidente AB (fig. 132, *a*), el rayo reflejado BD y la perpendicular BC levantada a la superficie en el punto de incidencia.

En el § 4.10 se estudió la reflexión de las ondas mecánicas. Vimos entonces que, al reflejarse las ondas, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Esta ley es válida para todas las ondas, cualquiera que sea su naturaleza, y se enuncia así: el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular al limite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia, se encuentran en un mismo plano, y el ángulo de reflexión γ es igual al ángulo de incidencia α.

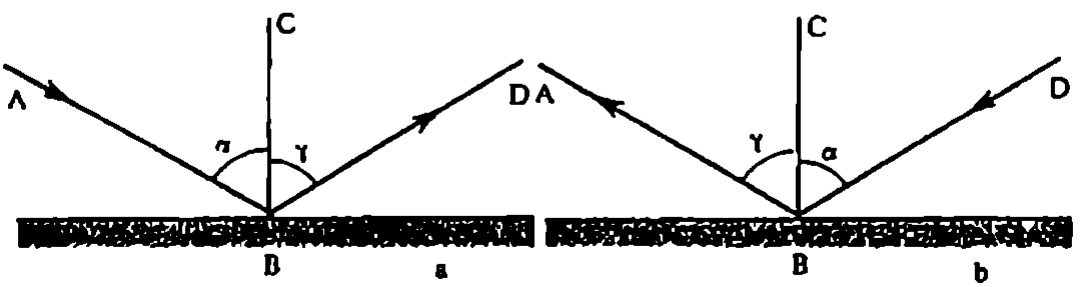


Fig. 132

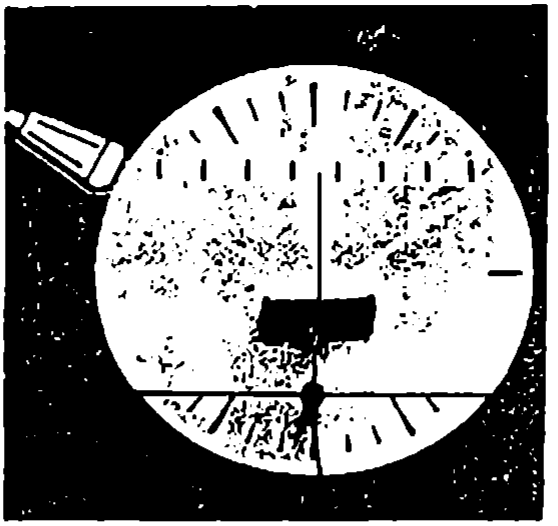


Fig. 133

Es evidente que esta ley se cumple también si la luz se propaga en sentido contrario (fig. 132, *b*). La *reversibilidad* de la marcha de los rayos luminosos es una de sus propiedades importantes

De que la ley de la reflexión de la luz es justa podemos cerciorarnos por medio de un experimento. Para eso, en el centro de un disco (fig. 133) se sujeta un espejo plano, o un trozo de vidrio de cara plana, de manera que la superficie reflectora coincida con el diámetro horizontal del disco. Una lámpara especial, que puede desplazarse siguiendo la circunferencia, emite un estrecho haz de luz que incide sobre la superficie reflectora. Los rayos incidente y reflejado dejan sobre la superficie blanca del disco sendas pistas luminosas. Cambiando el ángulo de incidencia desde 0 hasta 90° pueden observarse las variaciones del ángulo de reflexión De perpendicular levantada al plano del espejo en el punto de incidencia del rayo sirve en este caso el diámetro vertical del disco Las observaciones confirman la ley de la reflexión de la luz y la reversibilidad de la marcha de los rayos

FORMACIÓN DE LA IMAGEN EN UN ESPEJO PLANO. Supongamos que un punto luminoso se encuentra delante de una superficie plana reflectora de la luz, es decir, de un espejo plano. Se nos plantea el problema: ¿dónde veremos la imagen de este punto si miramos el espejo? Para responder a esta pregunta consideremos varios rayos que partiendo del punto S llegan, una vez reflejados (fig. 134), al ojo del observador A éste le parece que los rayos parten del punto S_1, que puede hallarse prolongando los rayos en sentido contrario hasta su intersección El punto S_1 será por esto la imagen del punto S en el espejo plano Esta imagen se llama *virtual*, ya que en el punto S_1 se intersecan no los rayos reflejados, sino sus prolongaciones A este punto no llega la energía luminosa.

Consideremos dos rayos cualesquiera de un haz divergente, por ejemplo, los rayos extremos del haz que llega al ojo (rayos AB y CD). En los triángulos SAC y S_1AC el lado AC es común Aplicando la ley de la reflexión se puede decir que los ángulos de los triángulos adyacentes a este lado común son respectivamente congruentes Por lo tanto, los triángulos son congruentes y coinciden uno con

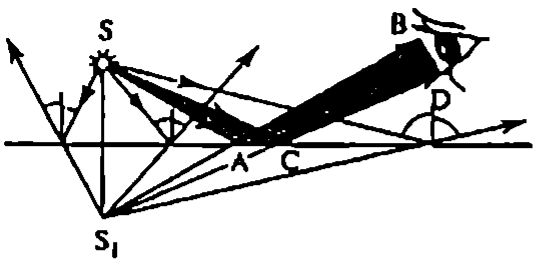


Fig. 134

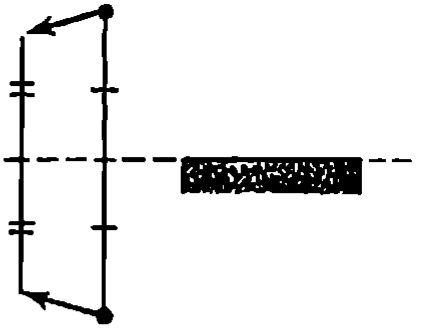


Fig. 135

otro si la figura se dobla por la línea del espejo. Esto significa que el punto S_1 es *simétrico* al S respecto del espejo Por eso, para hallar la imagen del punto basta bajar desde él una perpendicular al espejo o a su prolongación y continuarla una distancia igual por detrás del espejo.

La imagen de un objeto en un espejo plano tiene las mismas dimensiones que el propio objeto (fig. 135)

Existen los llamados *espejos esféricos*, cuya superficie reflectora tiene la forma de segmento esférico.

¿ ?

1. Enuncie la ley de reflexión de la luz.
2. ¿A qué se llama imagen virtual?
3. ¿Dónde se encuentra la imagen de un foco puntual de luz en un espejo plano?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. A orillas de un pequeño estanque hay un poste con un farol en lo alto. En la orilla opuesta se encuentra un observador. Un rayo de luz del farol, después de reflejarse en el agua, llega al ojo del observador Hallar, por construcción, la posición del punto sobre la superficie del agua en el cual se refleja el rayo que incide sobre el ojo. Calcular la distancia desde este punto hasta el poste, si la altura del último es H, la del observador h y la distancia entre el poste y el observador es l

Solución. Se construye la imagen S_1 del farol S que da la superficie CD del agua (fig. 136) Para eso se baja desde el punto S la perpendicular a la superficie

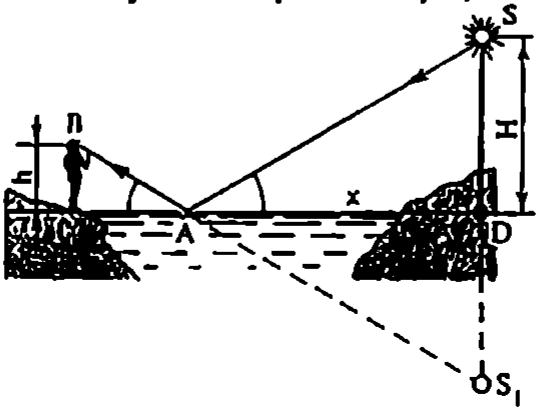


Fig. 136

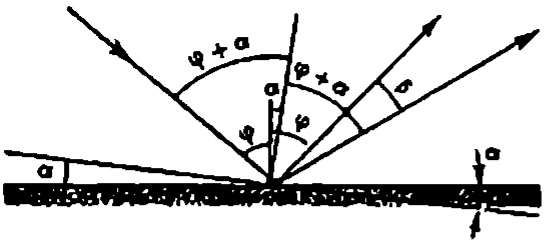


Fig. 137

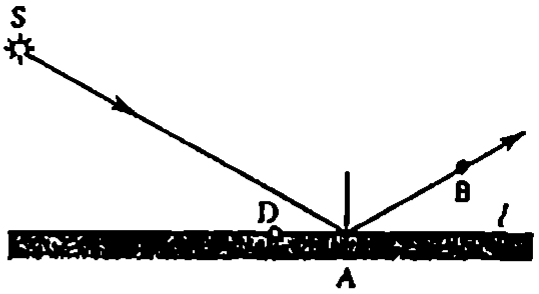


Fig. 138

CD. La imagen S_1 se encuentra en la prolongación de esta perpendicular y es simétrica al punto S respecto de la superficie CD, es decir, $|S_1D| = |SD|$. El rayo reflejado en la superficie del agua tiene la misma dirección que su prolongación en sentido contrario y pasa por el punto S_1. Por eso, para determinar la dirección del rayo reflejado se traza una recta desde el punto S_1 hasta el punto B, que coincide con el ojo del observador. Esta recta corta la superficie del agua en el punto A buscado

Los triángulos ADS y ACB son semejantes (por ser rectángulos y tener igual un ángulo agudo). Por consiguiente,

$$\frac{|DA|}{|AC|} = \frac{|SD|}{|BC|},$$

o bien

$$\frac{x}{l-x} = \frac{H}{h}.$$

De donde

$$x = \frac{lH}{H+h}$$

PROBLEMA 2. Un espejo plano se gira un ángulo $\alpha = 17°$ alrededor de un eje que se halla en el plano del espejo. ¿Qué ángulo girará el rayo reflejado, si la dirección del rayo incidente permanece invariable?

Solución. Sea φ el ángulo inicial de incidencia del rayo (fig. 137) Según la ley de la reflexión, el ángulo reflejado también será igual a φ y, por lo tanto, el ángulo entre el rayo incidente y el reflejado debe ser igual a 2φ Cuando el espejo gira el ángulo α, la perpendicular a él levantada en el punto de incidencia también gira un ángulo α. Por consiguiente, el nuevo ángulo de incidencia será igual a $\varphi + \alpha$. El nuevo ángulo de reflexión será igual a éste. De aquí que el ángulo entre el rayo incidente y el rayo reflejado se hará igual a $2(\varphi + \alpha)$, es decir, sufrirá una variación de 2α en comparación con el inicial. Por lo tanto, el ángulo reflejado girará un ángulo $\beta = 2\alpha = 34°$.

Ejercicio 7

1 Un haz de rayos paralelos sale de una linterna de proyección en dirección horizontal. ¿Bajo qué ángulo, respecto del plano horizontal, debe colocarse un espejo plano para que, después de reflejarse en él, marche el haz verticalmente? ¿Seguirá siendo paralelo el haz?

2 Un objeto pequeño se encuentra entre dos espejos planos que forman entre sí un ángulo $\alpha = 30°$. El objeto está a la distancia $l = 10$ cm de la línea de intersección de los espejos y a igual distancia de ambos. ¿Qué distancia x hay entre las imágenes virtuales de este objeto en los espejos?

3 Un rayo, procedente del foco puntual S (fig. 138), incide sobre un espejo plano en el punto A y, una vez reflejado, pasa por el punto B. Demostrar que si otro rayo del mismo foco pasara por el punto B después de reflejarse en el punto D, contiguo al A, del espejo, resultaría: 1) que no se cumple la ley de la reflexión, y 2) que el camino SDB sería recorrido por la luz en más tiempo que el camino SAB.

4 ¿Qué altura debe tener un espejo plano, colgado verticalmente, para que una persona, cuya altura sea H, se vea en él de cuerpo entero? ¿A qué alturas deben estar los bordes inferior y superior del espejo?

5 ¿Por qué no se puede emplear un espejo plano como pantalla de cine?

6.5. Ley de la refracción de la luz

En el límite entre dos medios la luz cambia su dirección de propagación. Una parte de la energía luminosa retorna al primer medio, es decir, *se refleja*. Si el segundo medio es transparente, otra parte de la luz, en determinadas condiciones, puede pasar a través del límite entre los dos medios, cambiando también, por lo general, la dirección en que se propaga. Este fenómeno se llama *refracción de la luz*.

A causa de la refracción se observa la variación aparente de las dimensiones, la forma y la disposición de los objetos. De esto pueden convencernos unas observaciones fáciles de hacer. Pongamos en el fondo de un vaso vacío una moneda o cualquier otro objeto pequeño. Situemos el vaso de tal forma que el centro de la moneda, el borde del vaso y nuestro ojo se encuentren en una recta. Sin cambiar la posición de la cabeza, echemos agua en el vaso. A medida que el nivel del agua sube, parece que sube también el fondo del vaso con la moneda. Esta, que antes sólo se veía parcialmente, se ve ahora entera.

En este mismo vaso metamos oblicuamente un lápiz. Si miramos desde arriba, parecerá que el lápiz se ha quebrado junto a la superficie del agua. El extremo del lápiz sumergido en el agua parece que está levantado (fig. 139). Si miramos el vaso desde un costado, vemos que la parte del lápiz sumergida

Fig. 139

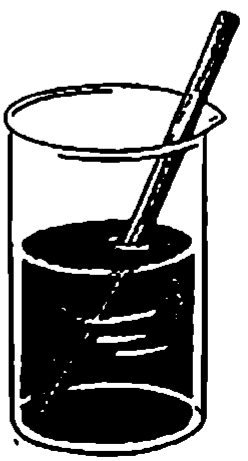


Fig. 140

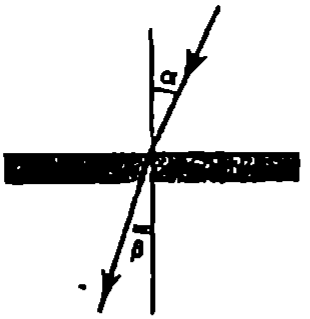


Fig. 141

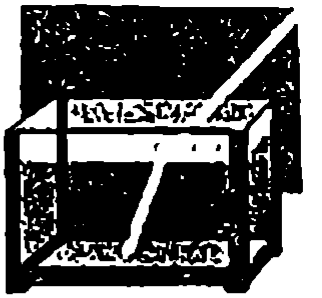


Fig. 142

parece que se ha desviado hacia un lado y que su diámetro es mayor (fig. 140).

LEY DE LA REFRACCIÓN DE LA LUZ. Estos fenómenos se explican por la variación que experimenta la dirección de los rayos en el límite entre dos medios. El rayo que se propaga en el primer medio y llega al límite se llama *rayo incidente*. Este rayo forma con la perpendicular al límite, levantada en el punto de incidencia, el ángulo α, que como ya sabemos recibe el nombre de *ángulo de incidencia*. El rayo que pasa al segundo medio se llama *rayo refractado*. El ángulo β que este rayo forma con la misma perpendicular, se denomina *ángulo de refracción* (fig. 141).

La posición mutua del rayo incidente, del reflejado y del refractado es fácil de determinar haciendo visible un estrecho haz luminoso. La marcha de este haz en el aire se puede ver si éste contiene un poco de humo o poniendo una pantalla que forme con el rayo un ángulo pequeño. El haz refractado se ve en el agua de un acuario teñida con fluoresceína (fig. 142).

Las observaciones muestran que al aumentar el ángulo de incidencia crece también el ángulo de refracción. Pero esta dependencia no es directamente proporcional.

La ley de la refracción de la luz fue establecida empíricamente en el siglo XVII y se enuncia como sigue: el rayo incidente, el rayo refractado y la perpendicular al límite de separación de dos medios levantada en el punto de incidencia del rayo, se encuentran en un mismo plano, y la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es una magnitud constante para los dos medios dados.

Si α es el ángulo de incidencia y β, el ángulo de refracción,

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = n \qquad (6.8)$$

¿Qué importancia tiene esta ley? La fórmula (6.8) define una cantidad innumerable de casos de refracción. Valiéndose de ella no es necesario hacer un experimento en cada caso. Tampoco hay que recordar o hacer tablas especiales del ángulo de incidencia y de su correspondiente de refracción para cada caso concreto. Conociendo la ley de la refracción se puede resolver cualquier problema relacionado con la refracción de la luz.

Está claro que lo mismo se puede decir de toda ley simple de la naturaleza establecida por vía experimental.

ÍNDICE DE REFRACCIÓN. La magnitud constante que figura en la ley

de la refraccion de la luz se llama *índice de refracción relativo* o *índice de refracción del segundo medio respecto del primero.*

El índice de refracción de un medio respecto del vacío recibe el nombre de *índice de refracción absoluto* de dicho medio. Este índice es igual a la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción cuando el rayo luminoso pasa del vacío al medio dado Entre el índice de refracción relativo n y los índices de refracción absolutos n_2 del segundo medio y n_1 del primer medio existe la relación

$$n = \frac{n_2}{n_1}, \tag{6.9}$$

que se demostrará en el capítulo 7. Por esta razón la ley de la refracción se puede escribir en la forma siguiente:

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{6.10}$$

El medio cuyo índice de refracción absoluto es menor suele llamarse *medio ópticamente menos denso.*

El índice de refracción absoluto de un medio tiene un profundo sentido físico. Está relacionado con la velocidad de propagación de la luz en el medio dado y depende del estado físico del medio en el cual se propaga la luz, es decir, de la temperatura de la sustancia, de su densidad y de la existencia en ella de tensiones elásticas. El índice de refracción depende también del carácter de la propia luz. Para la luz roja es menor que para la verde, y para la verde, menor que para la violeta

Por eso en las tablas de valores del índice de refracción de distintas sustancias suele indicarse para qué luz se da el valor de n y en qué estado se encuentra el medio. Si estas indicaciones se omiten, quiere decir que la dependencia de dichos factores es despreciable

En la mayoría de los casos se considera el paso de la luz a través del límite *aire–sólido* o *aire–líquido*, y no a través del límite *vacío–medio*. No obstante, el índice de refracción absoluto n_2 de una sustancia sólida o líquida se diferencia muy poco del índice de refracción de este mismo medio con relación al aire. Así, el índice de refracción absoluto del aire en condiciones normales para la luz amarilla es, aproximadamente, $n_1 \approx 1{,}000292$. Por lo tanto,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \tag{6.11}$$

El valor del límite de refracción para algunas sustancias, con relación al aire, se da en la tabla 2 (los datos se refieren a los rayos amarillos).

OBSERVACIÓN DE LA REFRACCIÓN DE LOS RAYOS LUMINOSOS. Para comprobar que la ley de la refracción es justa se puede utilizar un semicilindro transparente con la superficie de una de sus bases mateada. Este semicilindro se sujeta a un disco graduado de tal manera, que su eje coincida con el centro del disco (fig. 143) La luz sigue el radio del disco y se refracta en la superficie plana del semicilindro La marcha del rayo en el vidrio se ve en la base mateada. Trasladando la lámpara se cambia el ángulo de

Tabla 2

Sustancia	Indice de refracción con relación al aire
Agua (a 20°C)	1,33
Aceite de cedro (a 20°C)	1,52
Bisulfuro de carbono (a 20°C)	1,63
Hielo	1,31
Sal gema	1,54
Cuarzo	1,54
Rubí	1,76
Diamante	2,42
Vidrio de diversas clases	desde 1,47 hasta 2,01

incidencia. Los ángulos de incidencia se miden por la escala del disco. Del mismo modo se miden los ángulos de refracción. Utilizando las tablas trigonométricas, es fácil cerciorarse de que la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción permanece invariable cuando varía el ángulo de incidencia. Es fácil advertir también que el ángulo de refracción es menor que el de incidencia. Esto significa que cuando el rayo entra en un medio ópticamente más denso, se desvía hacia el lado de la perpendicular al límite de separación de los dos medios. Y únicamente en el caso en que el rayo sigue la perpendicular al límite de separación ($\alpha = 0$), pasa al segundo medio sin refractarse ($\beta = 0$).

En estos experimentos se puede apreciar que el haz refractado no lleva consigo toda la energía luminosa que transporta el haz incidente. Una parte de la luz se refleja en la superficie y retorna al primer medio (es decir, al aire). Vamos a variar el ángulo de incidencia desde 0 (incidencia normal) hasta 90° (rayo rasante). De acuerdo con la ley de la reflexión, el ángulo de reflexión también varía desde 0 hasta 90°. Observando atentamente se puede notar que

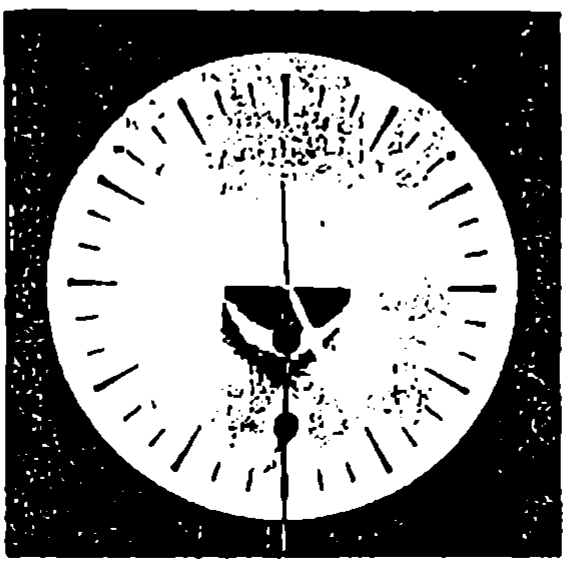


Fig. 143

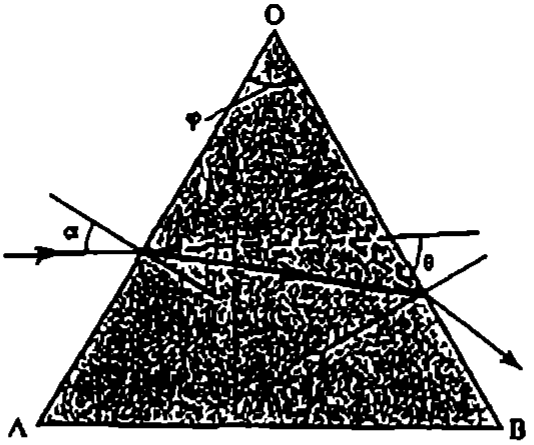


Fig. 144

a medida que aumenta el ángulo de incidencia, la intensidad de la luz reflejada crece. Un haz próximo al rasante se reflejará en el agua o en el vidrio casi totalmente.

MARCHA DE LOS RAYOS EN UN PRISMA TRIANGULAR En los instrumentos ópticos se emplea frecuentemente el prisma triangular, de vidrio o de otros materiales transparentes Este prisma se utiliza para analizar la composición de la luz. También se emplea en los gemelos (prismáticos), en los periscopios y en otros muchos aparatos

En la fig. 144 se representa la sección de un prisma de vidrio por un plano perpendicular a sus aristas laterales El rayo se refracta dos veces: una en la cara *OA* y otra en la cara *OB*. El ángulo φ entre estas caras se llama *ángulo refringente del prisma*. El ángulo θ de desviación del rayo depende del ángulo refringente φ del prisma, del índice de refracción *n* del material y del ángulo de incidencia α

6.6. Reflexión total

Volvamos otra vez a los experimentos en los cuales observamos la refracción de la luz en el límite *aire – agua* o *aire – vidrio*. Solo que ahora vamos a estudiar los fenómenos que se observan cuando la luz pasa del medio ópticamente más denso al ópticamente menos denso. Para eso en los experimentos con el semicilindro de vidrio pondremos la lámpara en la parte inferior del disco. Si el rayo incidente se hace pasar a lo largo del radio que antes seguía el rayo refractado, se puede ver que, cuando sale del vidrio, el rayo sigue la línea que antes correspondía al rayo incidente. Los rayos incidente y refractado son reversibles.

Además del rayo incidente, en el vidrio existe el rayo reflejado. Su huella puede notarse sobre la superficie mateada del semicilindro (fig. 145) La reflexión se produce de acuerdo con la ley de ésta: el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia

Si *n* es el índice de refracción del vidrio respecto del aire ($n > 1$), el índice de refracción del aire respecto del vidrio será igual a $1/n$. En este caso el vidrio es el primer medio y el aire, el segundo. La ley la refracción de la luz se

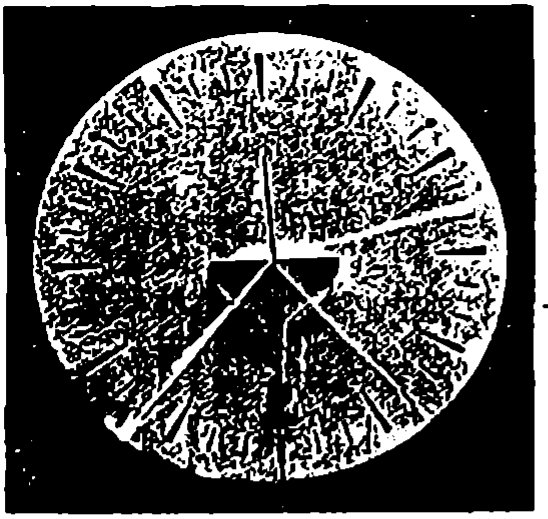


Fig. 145

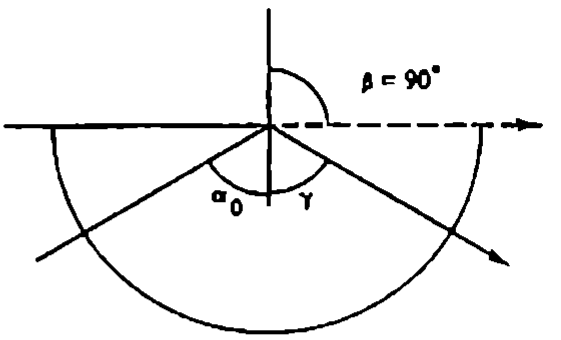


Fig. 146

escribe así

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{1}{n} \qquad (6.12)$$

Desplazando la lámpara vamos a aumentar el ángulo de incidencia. Al mismo tiempo irán aumentando el ángulo de reflexión, igual al de incidencia, y el de refracción. El ángulo de refracción será mayor que el de incidencia. Efectivamente, por la fórmula (6.12) tenemos $\operatorname{sen}\beta = n \operatorname{sen}\alpha$. Como en este caso $n > 1$, $\operatorname{sen}\beta > \operatorname{sen}\alpha$ y, por consiguiente, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia ($\beta > \alpha$). Esto quiere decir que al pasar a un medio ópticamente menos denso, el rayo se desvía alejándose de la perpendicular al límite entre los dos medios.

Observando atentamente se puede notar que a medida que aumenta el ángulo de incidencia, el brillo (y, por lo tanto, la energía) del haz reflejado crece al mismo tiempo que el brillo (energía) del haz refractado decrece. Con especial rapidez decrece la energía del haz refractado cuando el ángulo de refracción se aproxima a 90°. Finalmente, cuando el ángulo de incidencia se hace tal que el haz refractado marcha casi a lo largo del límite de separación (fig. 146), la parte de energía reflejada se aproxima al 100%. Al ángulo de refracción máximo $\beta = 90°$ corresponde el ángulo de incidencia α_0. Si la lámpara se coloca de manera que el ángulo de incidencia α sea mayor que α_0, veremos que el haz refractado desaparece y que toda la luz se refleja en el límite de separación, es decir, se produce la *reflexión total de la luz*.

La reflexión total de la luz se produce en el límite de un medio ópticamente más denso con un medio ópticamente menos denso, cuando el ángulo de incidencia α es mayor o igual que α_0. El ángulo de incidencia α_0 correspondiente al ángulo de refracción de 90° se llama, por esta razón, *ángulo límite de reflexión total*. Cuando $\operatorname{sen}\beta = 1$, la fórmula (6.12) toma la forma:

$$\operatorname{sen}\alpha_0 = \frac{1}{n} \qquad (6.13)$$

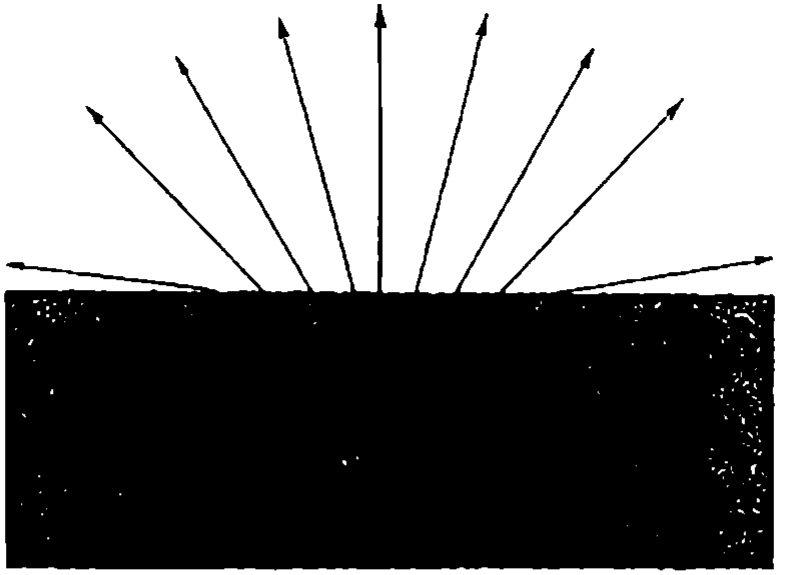


Fig. 147

Por esta igualdad se puede hallar el valor del ángulo límite de reflexión total α_0. Para el agua ($n = 1{,}33$) dicho valor resulta ser igual a 48°35', para el vidrio ($n = 1{,}5$) toma el valor de 41°50', y para el diamante ($n = 2{,}4$), el de 24°40. En todos los casos el segundo medio es el aire.

En la fig. 147 se representa el haz de rayos de un foco situado dentro del agua a poca distancia de la superficie. La mayor intensidad de la luz se indica con un mayor grosor de la línea que representa al rayo correspondiente.

El fenómeno de la reflexión total es fácil de observar en un experimento muy sencillo. Se echa agua en un vaso y se levanta éste hasta que queda algo más alto que el nivel del ojo. La superficie del agua mirada desde abajo a través de la pared del vaso parece brillante, como si estuviese plateada, a causa de la reflexion total de la luz.

La reflexión total se utiliza en la llamada *óptica de fibras* para la transmisión de la luz y de las imágenes por haces de fibras transparentes flexibles, los denominados *conductos* o *guías de luz*. Un guía de luz es una fibra de vidrio de forma cilíndrica recubierta con una capa de material transparente cuyo índice de refracción es menor que el de la fibra. En virtud de la reflexion total multiple, la luz se puede dirigir por cualquier camino (rectilíneo o curvado). Las fibras se juntan en haces ("multifibras"). Por cada una de las fibras se transmite un elemento determinado de la imagen (fig. 148). Las "multifibras" se utilizan, por ejemplo, en medicina para reconocer los órganos internos (donde la introducción de una lamparita ordinaria provoca un calentamiento indeseable).

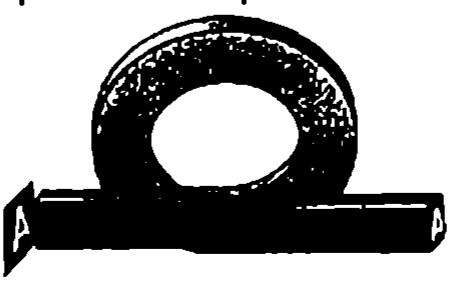


Fig. 148

Es de esperar que con el desarrollo de la tecnología de fabricación de haces de fibras largos (guías de luz) se hará posible realizar la comunicación (incluso televisiva) por medio de rayos luminosos.

¿ ?

1. Enuncie la ley de la refracción de la luz.
2. ¿En qué se diferencia el índice de refracción absoluto de la luz del relativo?
3. ¿A qué es igual el ángulo límite de reflexión total?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. Determinar qué ángulo θ se desvía de su dirección inicial un rayo de luz al pasar del aire al agua, si el ángulo de incidencia $\alpha = 75°$.

Solución. En la fig. 149 se ve que

$$\theta = \alpha - \beta$$

Según la ley de la refracción

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = n,$$

donde n es el índice de refracción del agua.
De aquí

$$\operatorname{sen}\beta = \frac{\operatorname{sen}\alpha}{n} \approx 0{,}727$$

En la tabla de senos hallamos que

$$\beta \approx 46°33'.$$

Por consiguiente,

$$\theta \approx 75° - 46°33' \approx 28°27'$$

PROBLEMA 2. Dibujar la marcha de los rayos a través de un prisma

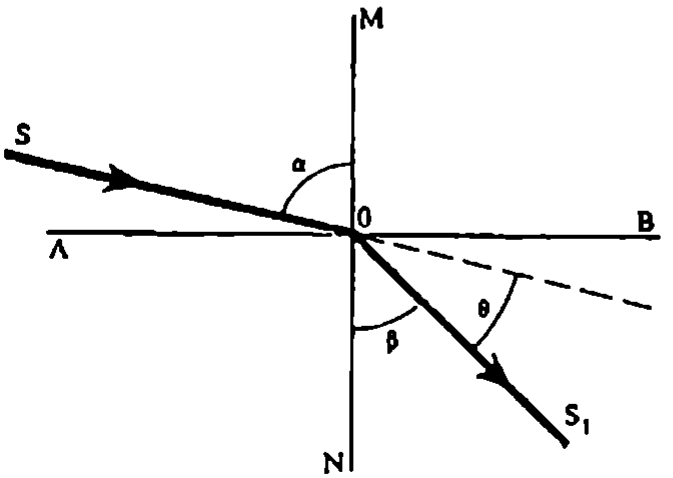


Fig. 149

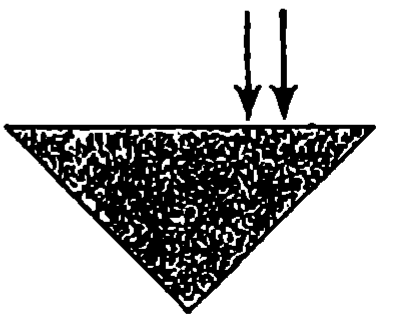


Fig. 150

triangular de vidrio cuya base es un triángulo rectángulo isósceles. Los rayos inciden perpendicularmente sobre la cara más ancha del prisma (fig. 150).

Solución. Al pasar por la cara ancha los rayos no cambian de dirección, porque el ángulo de incidencia es nulo. Sobre la cara derecha estrecha los rayos sufren la reflexión total, porque el ángulo de incidencia es igual a 45° y, por lo tanto, mayor que el de reflexión total para el vidrio. Después de su reflexión total en la cara derecha, los rayos inciden sobre la cara izquierda, sufren por segunda vez la reflexión total y salen del prisma en dirección perpendicular a la cara ancha. De este modo, la dirección del haz de luz, en este caso, cambia en 180°. Esta marcha de los rayos se utiliza, por ejemplo, en los gemelos prismáticos.

PROBLEMA 3. Determinar cuántas veces mayor es la profundidad real de una alberca que la aparente, si se mira verticalmente hacia abajo.

Solución. Se dibuja la marcha de los rayos que salen del punto S de la alberca y llegan al ojo del observador (fig. 151). Como la observación se hace verticalmente, uno de los rayos, SA, se dirige perpendicularmente a la superficie del agua, y el otro, SB, formando un pequeño ángulo α con la perpendicular. (Los rayos que forman ángulos α grandes no irán a parar al ojo.) Después de refractarse en la superficie del agua los rayos forman un haz divergente. El vértice de éste haz es la imagen virtual S_1 del punto S.

El ángulo ASB es igual al ángulo de incidencia α (por ser alterno interno), y el ángulo AS_1B es igual al de refracción β (por ser correspondiente con rectas paralelas). Los triángulos rectángulos ASB y AS_1B tienen común el cateto AB, que puede expresarse por medio de la profundidad real de la alberca $|SA| = H$ o por medio de la profundidad aparente $|S_1A| = h$:

$$|AB| = H \operatorname{tg}\alpha = h \operatorname{tg}\beta$$

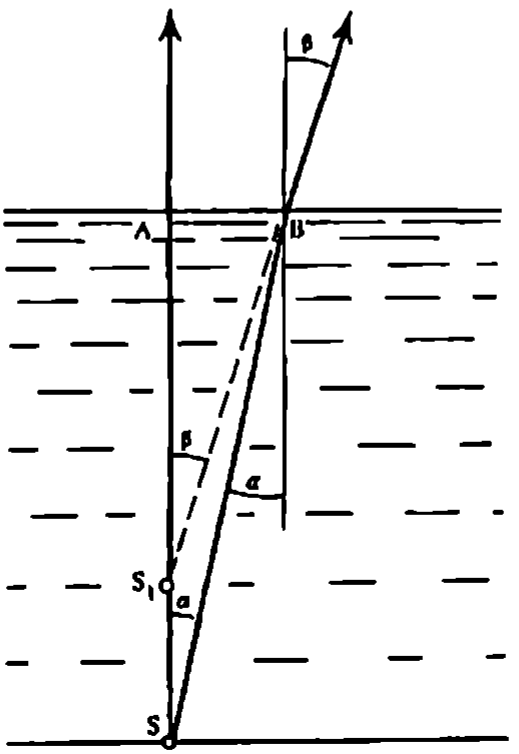


Fig. 151

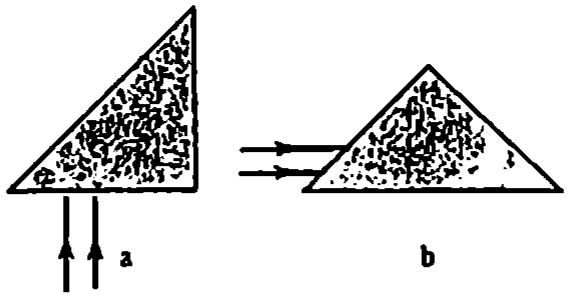


Fig. 152

De aquí

$$\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}.$$

Como los ángulos α y β son pequeños,

$$\frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} \approx \frac{\operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\alpha} = n.$$

Por consiguiente,

$$\frac{H}{h} = n.$$

La profundidad real de la alberca es $n = 1{,}3$ veces mayor que la aparente

---

Ejercicio 8

1. Calcular el índice de refracción del agua respecto del diamante y del bisulfuro de carbono respecto del hielo.
2. El ángulo de incidencia de unos rayos paralelos sobre un lámina de vidrio de caras paralelas es igual a 60°. Hallar la distancia entre los puntos por los cuales emergen de la lámina los rayos paralelos, si la distancia entre los rayos que pasan a través de la lámina es igual a 0,7 cm.
3. Si un objeto cualquiera se mira a través de un prisma triangular, la imagen parece desviada. ¿Hacia qué lado?
4. Un rayo de luz que viene de dentro del agua sufre la reflexión total en la superficie de ésta. ¿Saldrá el rayo al aire si sobre la superficie del agua se deposita una capa de aceite de cedro?
5. La sección de un prisma es un triángulo equilátero. Un rayo pasa a través del prisma refractándose en puntos equidistantes del vértice. ¿Cuál es el valor máximo permisible del índice de refracción n de la sustancia del prisma?
6. Represente la marcha de los rayos a través de un prisma triangular de vidrio cuya base es un triángulo rectángulo isósceles. Los rayos inciden sobre el prisma como se indica en las figs. 152, *a* y *b*. ¿Seguirá siendo la misma la marcha de los rayos si el prisma se sumerge en agua?

6.7. Lente

Hasta ahora hemos considerado la reflexión de la luz en el límite de separación plano de dos medios. Pero en la práctica se utiliza mucho la refracción en superficies esféricas. .

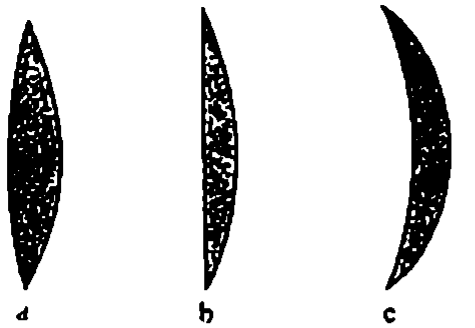


Fig. 153

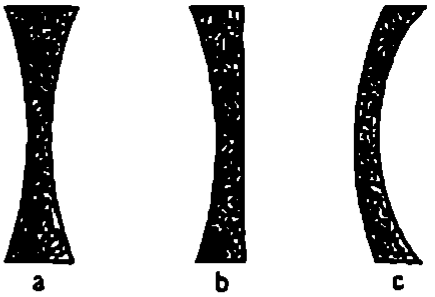


Fig. 154

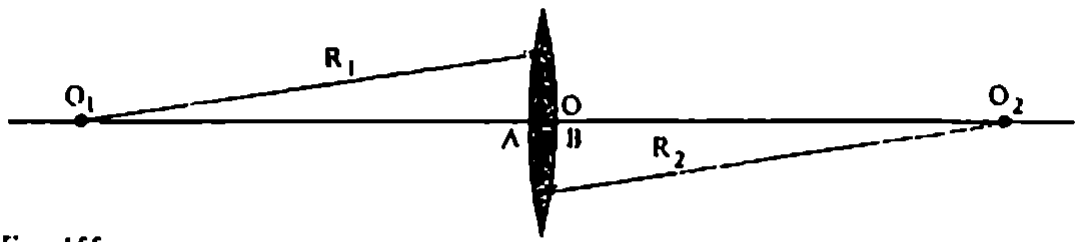


Fig. 155

Un cuerpo transparente limitado por dos superficies esféricas se llama lente.

TIPOS DE LENTES. Una lente puede estar limitada por dos superficies esféricas convexas (lente biconvexa, fig. 153, *a*), por una superficie esférica convexa y otra plana (lente plano-convexa, fig. 153, *b*) o por una superficie esférica convexa y otra cóncava (lente cóncavo-convexa, fig. 153, *c*). Todas estas lentes son más gruesas en el centro que en los bordes y reciben el nombre de lentes *convexas*.

Las lentes que en el centro son más delgadas que en los bordes se llaman *cóncavas*. En la fig. 154 se ven tres tipos de lentes cóncavas: bicóncava, *a*, plano-cóncava, *b* y convexo-cóncava, *c*.

LENTE DELGADA. Vamos a estudiar el caso más simple, en el cual el espesor de la lente $l = |AB|$ es despreciable por su pequeñez en comparación con los radios R_1 y R_2 de las superficies de la lente (fig. 155) y con la distancia del objeto a la lente. Esta lente se llama *delgada*. En adelante, siempre que se hable de lentes, se sobrentiende que se trata de lentes delgadas.

Los puntos A y B, vértices de los segmentos esféricos, están tan próximos entre sí en la lente delgada que pueden tomarse por uno solo, al que se da el nombre de *centro óptico de la lente* y se designa por medio de la letra O. El rayo de luz que pasa a través del centro óptico de la lente prácticamente no se refracta.

La recta O_1O_2 que pasa por los centros de curvatura de las superficies esféricas que limitan la lente se llama *eje óptico principal*. Este eje en una lente delgada pasa por el centro óptico. Cualquiera otra recta que pase por el centro óptico de ella recibe el nombre de *eje óptico secundario* (fig. 156).

IMAGEN CREADA POR UNA LENTE. De un modo semejante al espejo plano, la lente crea imágenes de las fuentes luminosas. Esto significa que la luz de un punto cualquiera de un objeto (fuente), una vez refractada en la lente,

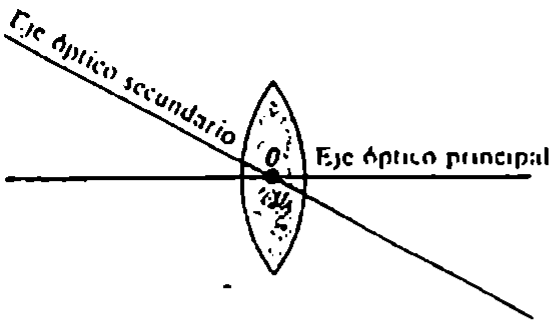


Fig. 156

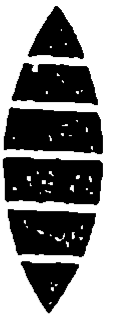


Fig. 157

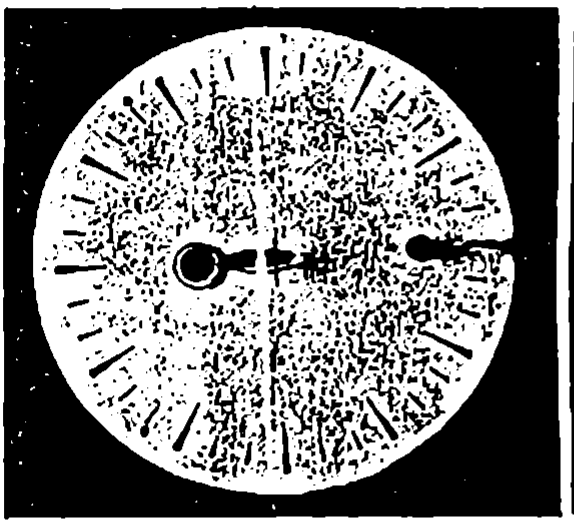


Fig. 158

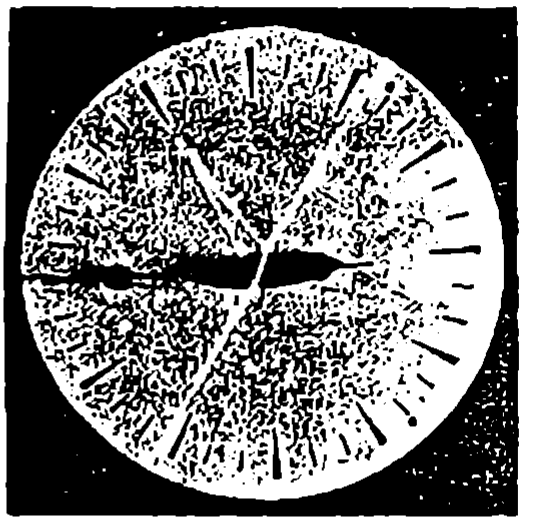


Fig. 159

vuelve a convergir en un punto (imagen), con independencia de la parte de la lente a través de la cual pasaron los rayos. Si al emerger de la lente los rayos convergen, forman una imagen real. En el caso en que los rayos después de pasar por la lente divergen, se intersecan en un punto no los propios rayos, sino sus prolongaciones. La imagen es entonces virtual. Esta imagen se puede observar a simple vista o valiéndose de aparatos ópticos[1].

LENTE CONVERGENTE. Por lo general, las lentes se hacen de vidrio. Las lentes convexas son convergentes. Cualquiera de ellas se puede representar esquemáticamente como un conjunto de prismas de vidrio (fig. 157). En el aire cada prisma desvía los rayos hacia su base. Todos los rayos que pasan a través de la lente se desvían hacia el eje óptico principal de esta.

La refracción de los rayos en una lente convergente se puede observar experimentalmente. La lente se sujeta en el disco (véanse los §§ 6.4, 6.5, 6.6). Primero se dirige el rayo a lo largo del eje óptico principal y se comprueba que pasa a través de la lente sin refractarse (fig. 158). Luego se hace pasar el rayo a lo largo de un eje secundario (es decir, también a través del centro óptico) y sólo se observa un pequeño corrimiento paralelo del rayo refractado (fig. 159).

[1] Los rayos o sus prolongaciones se cortan prácticamente en un punto si forman ángulos pequeños con el eje óptico principal.

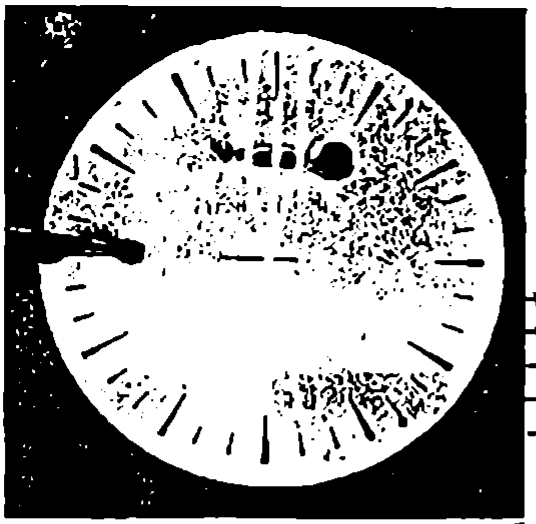


Fig. 160

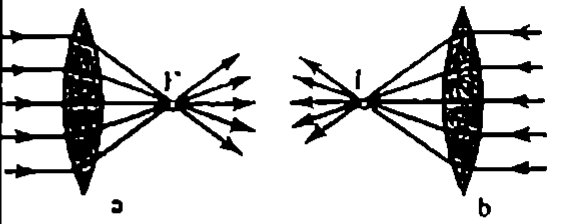


Fig. 161

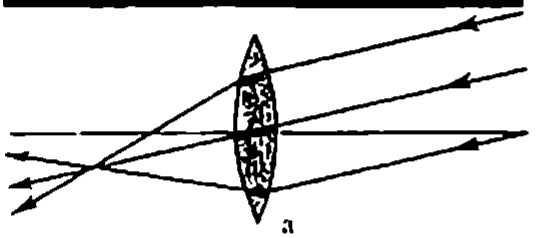
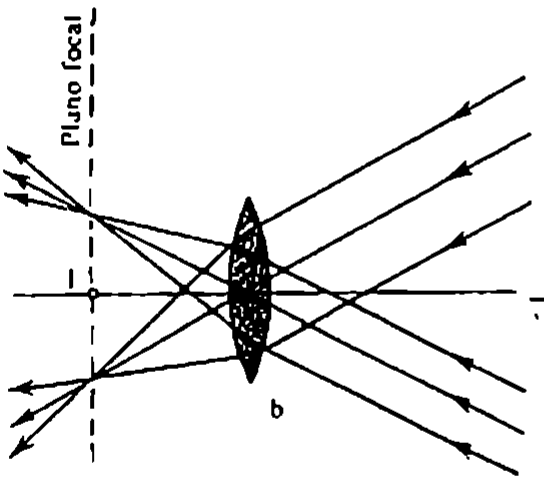


Fig. 162



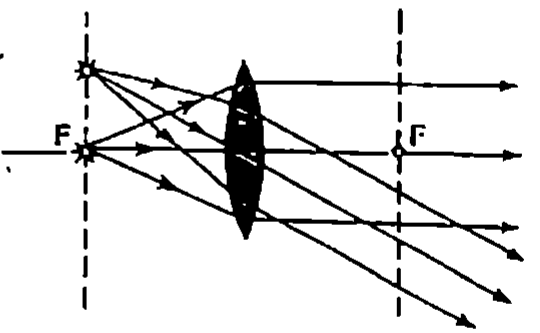


Fig. 163

Despues de esto se dirigen verticalmente desde la lámpara a la lente tres rayos paralelos Una vez refractados, salen de la lente y se cortan en un punto (fig. 160).

El punto en que se cortan después de refractarse en una lente convergente los rayos que inciden sobre ella siendo paralelos al eje óptico principal se llama foco principal de la lente Este punto se designa con la letra *F* (fig 161, *a*).

Los rayos paralelos al eje óptico principal se pueden dirigir sobre la lente por el lado opuesto. El punto en que se encuentran después de pasar por la lente sera el segundo foco principal (fig. 161, *b*).

Asi, pues, una lente tiene dos focos principales En un medio homogéneo estos focos están situados a ambos lados de la lente y a una misma distancia de

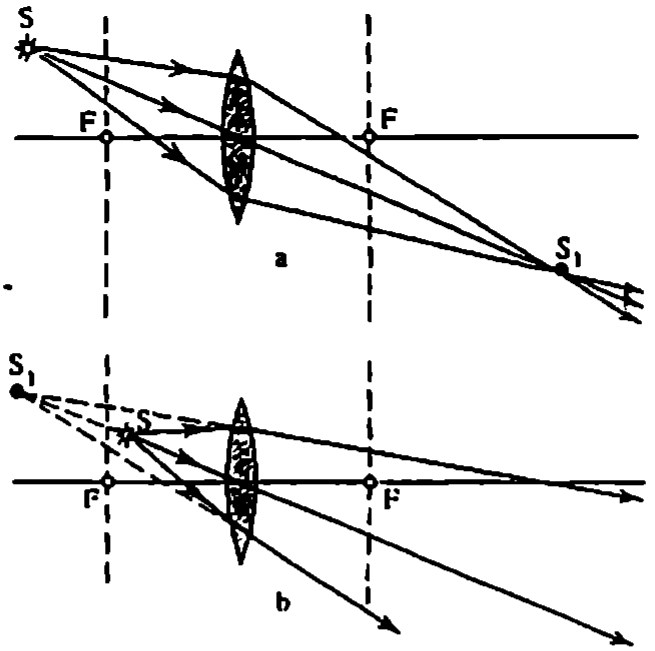


Fig. 164

ella. Esta distancia recibe el nombre de *distancia focal de la lente* y de ordinario se designa también con la letra F (lo mismo que los focos).

Ahora se lanzan tres rayos paralelos de la lámpara de manera que formen ángulo con el eje óptico principal. En este caso vemos que la intersección no se produce en el foco principal, sino en otro punto (fig. 162, *a*). Pero es interesante que los puntos de intersección de los rayos que inciden sobre la lente en haces paralelos, formando ángulos distintos con el eje óptico principal, se encuentran en un plano perpendicular a dicho eje que pasa por el foco principal (fig 162, *b*) Este plano se denomina *plano focal*. Si un punto luminoso se coloca en el foco de la lente (o en cualquier punto del plano focal), después de la refracción se obtiene rayos paralelos (fig 163) Si el punto luminoso se aleja de la lente, los rayos detrás de ésta se hacen convergentes y dan una imagen real (fig. 164, *a*) En cambio, cuando el punto luminoso se encuentra más cerca de la lente que el foco, los rayos refractados divergen y la imagen que se obtiene es virtual (fig 164, b).

LENTE DIVERGENTE. Las lentes convexas son divergentes. Sujetemos una de estas lentes al disco de pruebas y dirijamos sobre ella rayos paralelos al eje óptico principal. Los rayos refractados divergen (fig. 165) y sus prolongaciones se cortan en el foco principal de la lente divergente. En este caso el foco principal es virtual (fig. 166, *a*) y se encuentra a la distancia F de la lente. El segundo foco principal se encuentra al otro lado de la lente y la misma distancia de ella, si el medio es el mismo a ambos lados de la lente (fig. 166, *b*).

POTENCIA ÓPTICA DE UNA LENTE. *La magnitud reciproca de la distancia focal se llama potencia óptica (o dióptrica) de la lente* Se simboliza con la letra D.

$$D = \frac{1}{F} \qquad (6\,14)$$

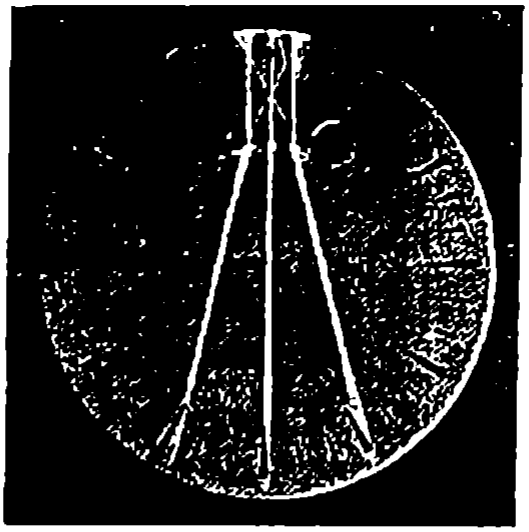


Fig. 165

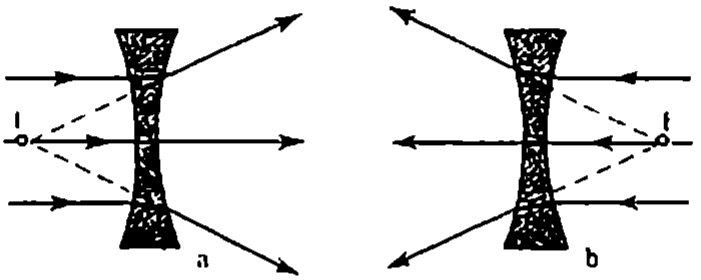


Fig. 166

Cuanto más cerca de la lente se encuentran sus focos, tanto mayor es la intensidad con que esta refracta los rayos, haciéndolos converger o diverger, y tanto mayor en valor absoluto es la potencia óptica de la lente.

La potencia óptica D de una lente se expresa en DIOPTRIAS (dptr). Tiene la potencia óptica de 1 dptr una lente de distancia focal igual a 1 m.

6.8. Construcción de la imagen producida por una lente

Las propiedades de una lente delgada quedan determinadas principalmente por la posición de sus focos. Esto significa que, conociendo la distancia desde el objeto hasta la lente y la distancia focal (o posición de los focos), se puede determinar la distancia hasta la imagen, sin recurrir al estudio de la marcha de los rayos dentro de la lente. En virtud de esto no es de rigor la necesidad de representar en el dibujo la forma exacta de las superficies esféricas de la lente. La lente convergente se representa convencionalmente como muestra la fig. 167, y la divergente, como se ve en la fig. 168.

Ya se sabe que todos los rayos que parten de cualquier punto del objeto, después de pasar por la lente se cortan también en un punto. Precisamente en virtud de esta propiedad la lente delgada da una imagen de cualquier punto del objeto y, por consiguiente, de todo el objeto en conjunto.

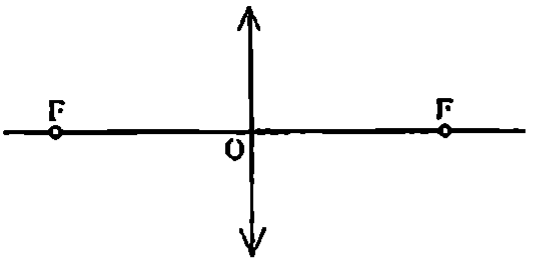


Fig. 167

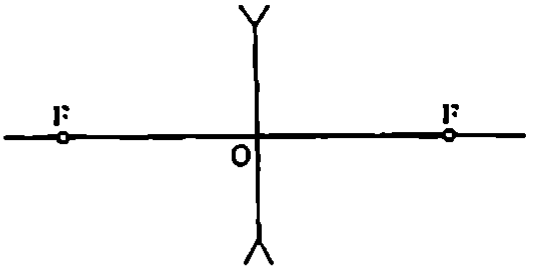


Fig. 168

Para construir las imágenes que se obtienen por medio de una lente convergente, cuyos focos y centro óptico se dan, vamos a utilizar con preferencia los tres tipos de rayos "más convenientes". Como se dijo en el párrafo anterior, los rayos paralelos al eje óptico principal, después de refractarse en la lente, pasan por el foco. De la reversibilidad de la marcha de los rayos se sigue que los rayos que van hacia la lente pasando por su foco, después de refractarse siguen la dirección paralela al eje óptico principal. Finalmente, los rayos que pasan por el eje óptico de la lente no cambian de dirección, sino que sólo sufren un desplazamiento paralelo que, en el caso de una lente delgada, es muy pequeño y se puede despreciar

Construyamos la imagen del objeto AB (fig. 169). Para hallar la imagen del punto A, se dirige un rayo AC paralelo al eje óptico principal. Después de refractarse, este rayo pasa por el foco de la lente. Otro rayo, el AD, se puede dirigir de modo que pase por el foco. Una vez refractado, este rayo sigue una dirección paralela al eje óptico principal. En el punto de intersección de estos dos rayos se encontrará la imagen A_1 del punto A. Así se pueden construir también todos los demás puntos de la imagen. Pero no debe pensarse que la imagen la crean dos o tres rayos; la crea todo el conjunto de innumerables rayos que parten del punto A y convergen en el punto A_1. En particular, al punto A_1 llega el rayo AOA_1, que pasa por el centro óptico O de la lente. Así, pues, para construir la imagen de un punto se pueden utilizar dos cualesquiera de los tres rayos "más convenientes", cuyas marchas a través de la lente se conocen: 1) el rayo que pasa por el centro óptico, 2) el rayo que incide sobre la lente siendo paralelo al eje óptico principal, y 3) el rayo que pasa por el foco.

Consideremos también el caso en que es necesario construir la imagen de un punto situado en el eje óptico principal. La dificultad consiste en este caso en

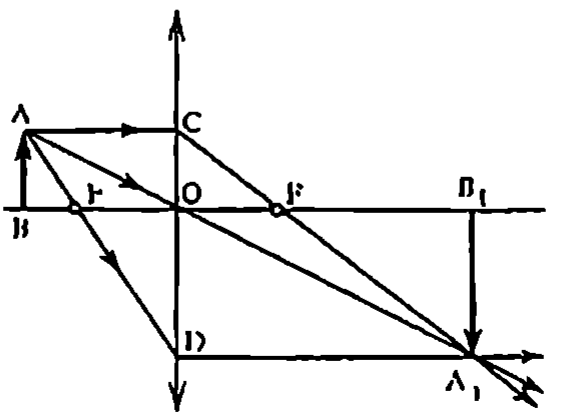


Fig. 169

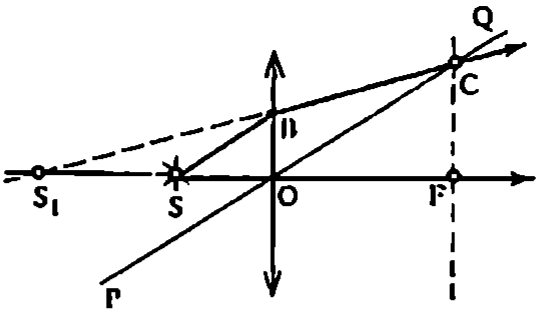


Fig. 170

que los tres rayos "más convenientes" se confunden en el rayo SF, que coincide con el eje óptico principal. Por eso se plantea la necesidad de determinar la marcha de un rayo arbitrario SB (fig. 170) que incide sobre la lente en el punto B. Para construir el rayo refractado se traza un eje óptico secundario PQ, paralelo al rayo SB. Luego se construye el plano focal y se halla el punto C de intersección de éste con el eje óptico secundario. Por este punto pasa el rayo refractado BC. Así se ha construido la marcha de dos rayos que parten del punto S. Después de la refracción en la lente estos rayos divergen. La imagen S_1 del punto S será virtual, ya que el objeto se encuentra entre el foco y la lente.

6.9. Fórmula de la lente delgada. Aumento de la lente

Vamos a deducir una fórmula que relaciona tres magnitudes: la distancia d del objeto a la lente, la distancia f de la imagen a la lente y la distancia focal F.

De la semejanza de los triángulos AOB y A_1B_1O (véase la fig. 169) se sigue la relación

$$\frac{|BO|}{|OB_1|} = \frac{|AB|}{|A_1B_1|}$$

De la semejanza de los triángulos COF y FA_1B_1 se tiene

$$\frac{|CO|}{|A_1B_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|}.$$

Como $|AB| = |CO|$, resulta que

$$\frac{|AB|}{|A_1B_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|}.$$

De donde

$$\frac{|BO|}{|OB_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|},$$

o bien

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f-F}$$

Después de unas simples transformaciones, se obtiene.

$$fF + Fd = fd.$$

Dividiendo por el producto Ffd todos los términos de esta igualdad, resulta.

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \tag{6.15}$$

o bien

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \tag{6.16}$$

La relación (6.15) ó (6.16) recibe el nombre de *fórmula de la lente delgada*. Las magnitudes d, f y F pueden ser tanto positivas como negativas. Diremos (sin entrar en demostraciones) que cuando se aplica la fórmula de la lente delgada los signos de los términos deben ponerse de acuerdo con la regla siguiente: si la lente es convergente, su foco es real y delante del miembro $1/|F|$ se pone el signo "más" En el caso de una lente divergente, $F < 0$ y en el segundo miembro de la fórmula (6.15) figurará la magnitud nagativa $-1/|F|$. Delante del término $1/|f|$ se pone el signo "más" si la imagen es real, y el signo "menos", si es virtual Finalmente, delante del término $1/|d|$ se pone el signo "más" en el caso de un punto luminoso real, y "menos" si dicho punto es virtual (es decir, si sobre la lente incide un haz de rayos cuyas prolongaciones se cortan en un punto).

Cuando F, f o d se desconocen, delante del término correspondiente $1/F$, $1/f$ ó $1/d$ se pone el signo "más". Pero si como resultado del cálculo de la distancia focal o de la distancia de la lente a la imagen o al objeto se obtiene una magnitud negativa, esto significa que el foco, la imagen o el objeto son virtuales.

AUMENTO DE UNA LENTE Las dimensiones de la imagen que produce la lente difieren, por lo general, de las del objeto La diferencia de dimensiones del objeto y la imagen se caracterizan por el *aumento*

Se llama aumento lineal la razón de la dimensión lineal de la imagen a la dimensión lineal del objeto.

Para hallar el aumento lineal vamos a utilizar otra vez la fig. 169 Si la altura del objeto AB es h y la altura de la imagen A_1B_1 es H,

$$\Gamma = \frac{H}{h} \tag{6.17}$$

es el aumento lineal.

De la semejanza de los triángulos OAB y OA_1B_1 se infiere que

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$$

Por consiguiente, el aumento de la lente es igual a la razón de la distancia desde la imagen a la lente, a la distancia de la lente al objeto

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \tag{6.18}$$

¿ ?

1. ¿Qué lente se llama delgada?
2. ¿A qué se llama foco principal de una lente?
3. Escriba la fórmula de la lente.
4. ¿Qué rayos son más convenientes para construir la imagen que produce una lente?
5. ¿A qué se llama aumento de una lente?

6.10. Cámara fotográfica. Aparato de proyección

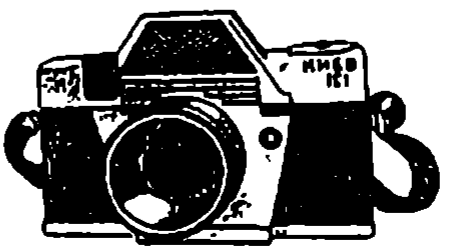
En las leyes de la óptica geométrica se basa la estructura y el funcionamiento de diversos aparatos ópticos. En primer lugar vamos a estudiar aquellos en que la imagen que se obtiene es real. Para fijar y conservar esta imagen se aprovecha la propiedad química de la luz.

La fotografía fue inventada en los años 30 del siglo XIX y ha recorrido un largo camino de perfeccionamiento. La fotografía moderna, de formato pequeño, instantánea, en color, estereoscópica, se emplea mucho en todas las esferas de la vida. Su papel en la investigación de la naturaleza es grande. La fotografía permite registrar objetos diferentes (desde microscópicos hasta cósmicos), radiaciones invisibles, etc. Para todos es conocida la importancia de la fotografía artística, de la que desciende el cinematógrafo.

CÁMARA FOTOGRÁFICA. Las partes fundamentales de un aparato fotográfico son la cámara oscura y un sistema de lentes llamado objetivo. El objetivo más simple es una lente convergente. El objetivo crea cerca de la pared trasera de la cámara una imagen real invertida del objeto que se fotografía. En la mayoría de los casos el objeto se encuentra a una distancia mayor que el doble de la distancia focal. En estas condiciones la imagen que se obtiene resulta disminuida. En el plano en que se forma la imagen se coloca una placa o película recubierta de sustancia sensible a la acción de la luz, que recibe el nombre de emulsión fotográfica.

El objeto que se fotografía puede estar a distancias diferentes de la cámara. Por lo tanto, la distancia entre el objetivo y la película también debe variar. Esta variación se consigue, de ordinario, desplazando el objetivo por medio de una rosca helicoidal o alargando y acortando la cámara (para lo cual las paredes del aparato se hacen en forma de "fuelle").

La energía luminosa que incide sobre la capa sensible a la luz se dosifica por medio del *obturador*. Éste deja pasar la luz sólo durante un tiempo determinado (*tiempo de exposición*). El tiempo de exposición depende de la sensibilidad de la emulsión fotográfica y de la iluminación de la película. Se comprende fácilmente que la película estará tanto más iluminada cuanto mayores sean las



Cámara fotográfica moderna

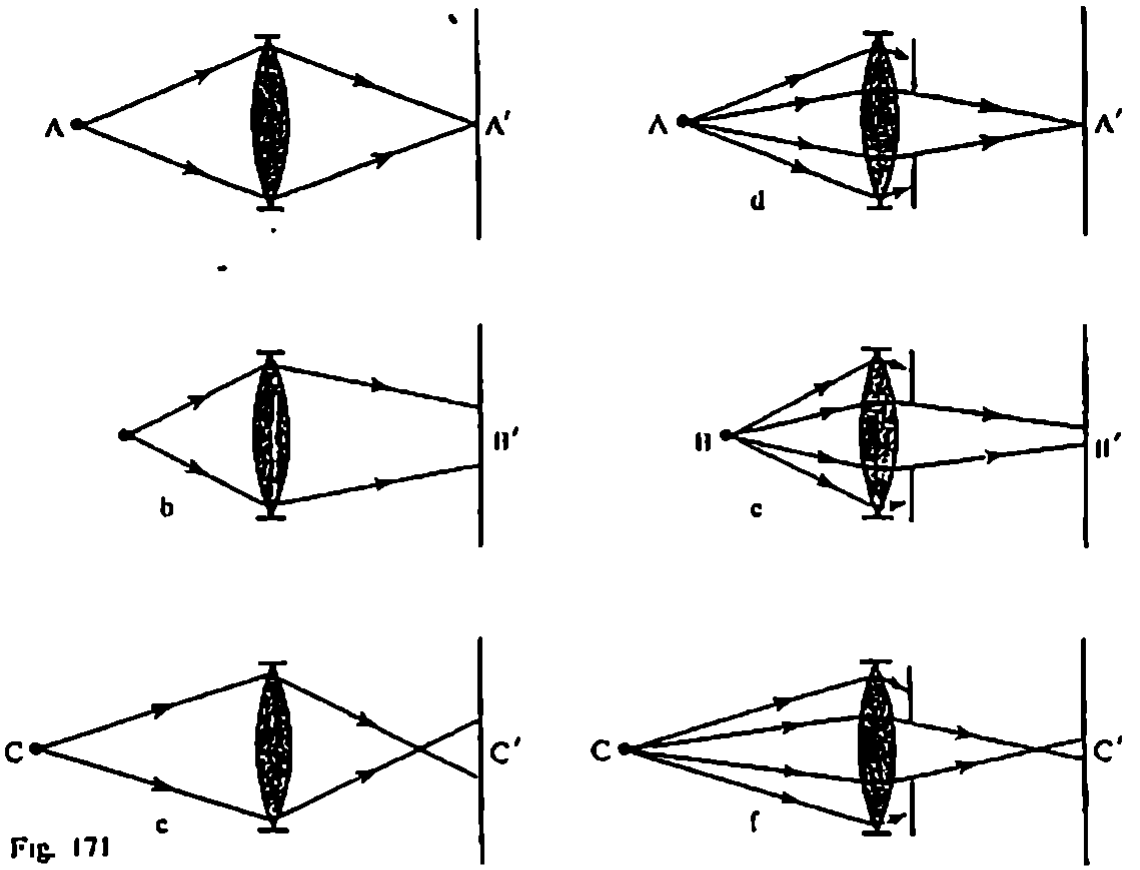


Fig. 171

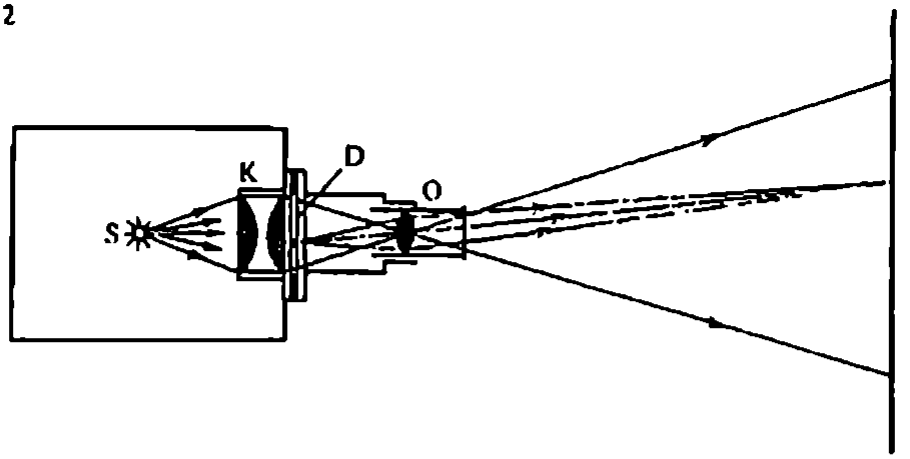
dimensiones de las lentes del objetivo y cuanto más cerca del objetivo se encuentre la capa sensible a la luz. El diámetro de la abertura útil del objetivo se puede variar valiéndose del *diafragma*, con lo que se regula la iluminación de la película fotográfica. Pero el diafragma desempeña además otra función.

Supongamos que se quiere fotografiar un punto luminoso *A*, situado a cierta distancia del aparato, y que la imagen de este punto que se obtiene sobre la película es también un punto (fig. 171, *a*). Entonces la imagen del punto *B* que está más cerca del objetivo (fig. 171, *b*), así como la imagen del punto *C* que se encuentra más lejos (fig. 171, *c*), se obtienen en forma de círculos pequeños. Si delante del objetivo se coloca un diafragma (figs. 171, *d*, *e*, *f*), el diámetro de estos circulitos será tanto menor cuanto más pequeño sea el diámetro de la abertura útil del objetivo (compárense las figs. 171, *b* y *c* con las figs. 171 *e* y *f*). Disminuyendo la abertura del diafragma, se puede conseguir que las imágenes de los puntos que se encuentran a diferentes distancias del aparato sean suficientemente nítidas

Con esto, como suele decirse, aumenta la *profundidad de campo*.

APARATO DE PROYECCIÓN. Sirve para obtener sobre una pantalla la imagen real, aumentada, de un objeto. Éste puede ser un dibujo o una fotografía hecha sobre base transparente (*diapositiva*) que se ilumina por detrás. El esquema de la estructura de un aparato de proyección se da en la fig. 172. La imagen de la diapositiva *D* se crea sobre la pantalla por medio del *objetivo O*. El

Fig. 172



sistema de lentes *K*, llamado *condensador*, sirve para concentrar la luz de la fuente sobre la diapositiva El objetivo proyecta la diapositiva iluminada sobre la pantalla. La marcha de los rayos desde la diapositiva hasta la pantalla se representa en la figura

El aumento del aparato de proyección se puede variar acercando el objetivo a la diapositiva o alejándolo de ella y cambiando al mismo tiempo la distancia desde el aparato hasta la pantalla

También existen aparatos de proyección que permiten obtener sobre la pantalla las imagenes de objetos tanto transparentes como opacos. Estos aparatos combinados se conocen con el nombre de *epidiascopios*. Para obtener la imagen de un objeto opaco, como, por ejemplo, del dibujo de un libro, se ilumina éste intensamente y se proyecta sobre la pantalla.

6.11. Ojo. Lentes

OJO El ojo humano tiene la forma de un globo casi esferico (fig. 173). Su diámetro es de cerca de 2,5 cm. Por fuera está revestido de una cubierta protectora *1*, de color blanco, denominada *esclerótica*. La parte delantera transparente *2* se llama *cornea transparente* o simplemente *córnea* En el esquema de la estructura del ojo se ve que detrás de la cornea,

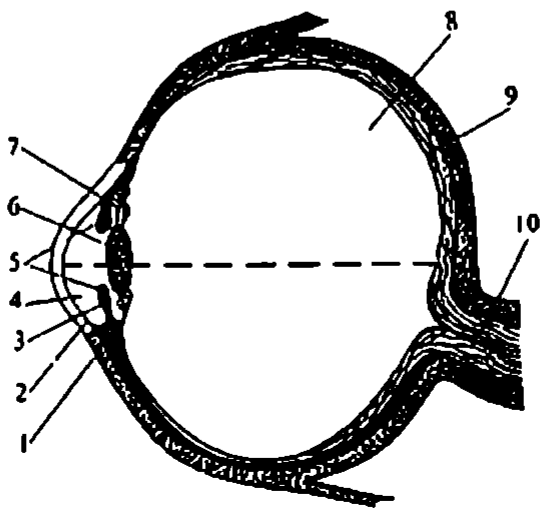


Fig. 173

a cierta distancia, se encuentra el *iris 3*, teñido de color por una sustancia especial. Entre la córnea y el iris se encuentra el *humor acuoso 4*. El iris tiene una abertura central *5* que recibe el nombre de *pupila* En dependencia de la intensidad de la luz incidente, el diámetro de la pupila varia accionado por un mecanismo reflejo desde 2 hasta 8 mm. Este proceso es semejante a la variación del diafragma en la cámara fotográfica. Detrás de la pupila está el *cristalino 6*, que es un cuerpo laminar transparente parecido a una lente. Un músculo especial (músculo ciliar) *7* puede hacer que, entre ciertos límites, cambie la forma del cristalino, aumentando su convexidad cuando se miran objetos próximos. La parte restante del ojo, hasta la pared posterior (fondo del ojo), la llena una masa gelatinosa denominada *humor o cuerpo vítreo 8*. El fondo del ojo está cubierto de una membrana muy compleja llamada *retina 9*, formada por las ramificaciones del nervio óptico *10*, cuyas extremidades tienen la forma de *bastoncitos* y de *conos*. Los bastoncitos y los conos son los elementos sensibles a la luz.

Los rayos de luz que inciden sobre el ojo experimentan la refracción máxima en la superficie de la córnea, una pequeña refracción adicional sufren en el cristalino. En conjunto, el sistema óptico del ojo puede considerarse como una lente convergente con distancia focal variable y "profundidad" (distancia desde la lente a la pantalla) constante. De "pantalla", sobre la cual se forma la imagen real invertida del objeto que se mira, sirve la retina. La irritación de las extremidades nerviosas (bastoncitos y conos) por la luz incidente provoca la sensación visual.

Si el objeto está muy lejos, la imagen se forma sobre la retina del ojo normal, sin que los músculos ciliares hagan ningún esfuerzo. Pero cuando el objeto se acerca se produce la compresión del cristalino y la distancia focal disminuye lo necesario para que el plano de la imagen vuelva a coincidir con la retina. Esto se logra en virtud de un esfuerzo reflejo del músculo, que hace que varíe la curvatura del cristalino. Esta adaptación del ojo a la variación de la distancia hasta el objeto que se mira recibe el nombre de *acomodación del ojo*. Al acercarse el objeto aumenta el ángulo visual φ (fig 174), bajo el cual se ven dos puntos próximos del objeto. Cuando este ángulo se hace mayor que un minuto, las imágenes de los puntos inciden sobre distintas extremidades nerviosas y los vemos separados. No obstante, aproximar el objeto al ojo hasta una distancia muy pequeña para poder distinguir sus detalles mínimos, no tiene sentido, ya que la acomodación del ojo es limitada, es decir, tiene su *punto próximo límite de acomodación*.

La distancia mínima del objeto al ojo, con la cual se pueden distinguir los detalles de aquél sin esforzar mucho el ojo, se llama *distancia de visión óptima*. Para el ojo normal la distancia de visión óptima se estima igual a 25 cm. A distancias menores una persona con vista normal sólo con dificultad puede acomodar su ojo

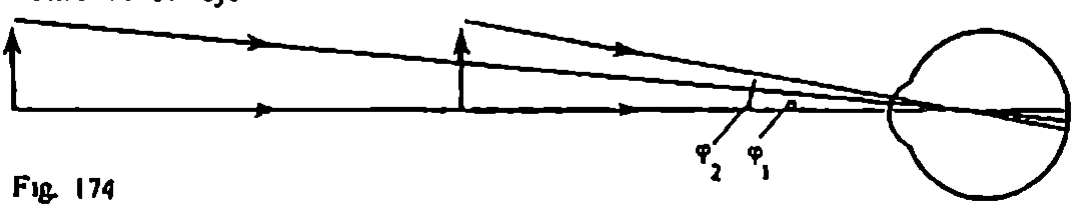


Fig. 174

Fig. 176

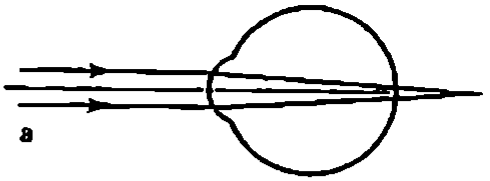
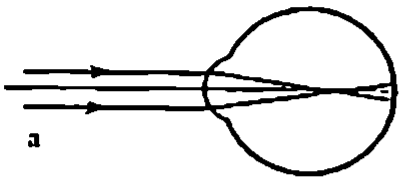
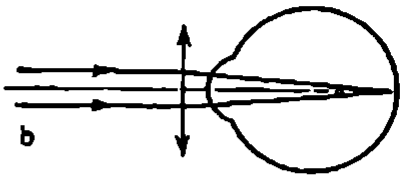
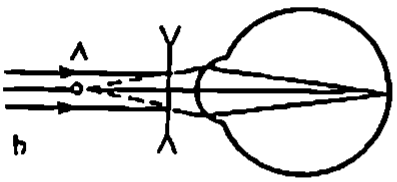
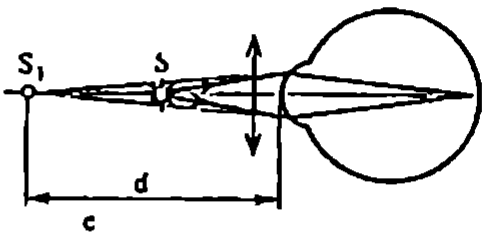


Fig. 175









El punto lejano de acomodacion del ojo normal se encuentra infinitamente lejos. Este punto corresponde al estado relajado del ojo.

El ojo humano está provisto de músculos que lo hacen girar de modo que su eje se dirija al objeto que se mira. Los esfuerzos que hacen los músculos del ojo izquierdo se diferencian tanto más de los que hacen los del derecho cuanto más cerca está el objeto Además, las imágenes de un objeto próximo sobre las retinas de los ojos derecho e izquierdo difieren algo entre si. Esto ofrece a la persona la posibilidad de apreciar la distancia que hay hasta el objeto o hasta sus partes y crea la sensación de volumen del cuerpo que se observa.

LENTES. Los ojos de muchas personas crean, en estado de relajación, la imagen de un objeto lejano no sobre la retina, sino delante de ella (fig. 175,*a*). Estas personas no pueden ver nitidamente los objetos que están lejos. Este defecto de la vista se llama *miopía*. Los miopes sólo ven los objetos nitidamente a partir de cierta distancia. Su punto lejano de acomodación del ojo se encuentra no en el infinito. Respectivamente también es menor la distancia de visión óptima La miopia se corrige usando lentes o gafas con lentes divergentes Los rayos paralelos, después de pasar por una de estas lentes, son percibidos como si procedieran del punto lejano de acomodación del ojo (punto A en la fig. 175,*b*). Por eso un miope con lentes (gafas) puede ver los objetos lejanos lo mismo que una persona con vista normal, es decir, sin hacer esfuerzo.

El defecto de la vista que hace que las imágenes de los objetos lejanos se formen detrás de la retina (fig 176,*a*) recibe el nombre de hipermetropia. El hipermétrope tiene que esforzarse ya para ver objetos lejanos, y cuando observa objetos próximos su acomodación se agota a distancias mayores de 25 cm.

La hipermetropia se corrige usando lentes convergentes. Para observar los objetos lejanos la potencia óptica de la lente debe ser tal que los rayos paralelos

se enfoquen sobre la retina (fig. 176,*b*) Los rayos procedentes de un objeto que se encuentre a la distancia de 25 cm (fig. 176, *c*) al pasar a través de esta lente se hacen menos divergentes. El objeto parecerá que está a la distancia d > 25 cm (punto S_1) a la cual el hipermétrope puede observar los objetos sin hacer esfuerzo apreciable. Por consiguiente, su distancia de visión óptima será la misma que la de un ojo normal.

6.12. Lupa. Microscopio

Para que los detalles pequeños del objeto que se observa puedan distinguirse, el ángulo visual debe ser suficientemente grande El ángulo visual se podría aumentar aproximando el objeto al ojo si la acomodación no tuviera límite.

LUPA. El aumento del ángulo visual sin esforzar el ojo se consigue por medio de instrumentos ópticos. Como se ve en la fig 174, a un ángulo de visión mayor corresponde una imagen también mayor en la retina. Cuando los ángulos son pequeños, la razón de las dimensiones de las imágenes son aproximadamente iguales a la razón de los ángulos de visión.

La razón del ángulo de visión, cuando el objeto se observa a través de un instrumento óptico, al ángulo de visión cuando se observa a simple vista se toma como característica del instrumento óptico con el nombre de *aumento angular*

El ángulo bajo el cual se ve el objeto a simple vista (fig. 177 *a*) es

$$\varphi = \frac{h}{d_0}$$

donde $d_0 = 25$ cm es la distancia de visión optima, h, la dimensión lineal del objeto.

El procedimiento más sencillo para aumentar el ángulo de visión, cuando se observan objetos pequeños, es utilizar una *lupa*. Se llama lupa una lente convergente, o un sistema de lentes, de distancia focal F pequeña (por lo general

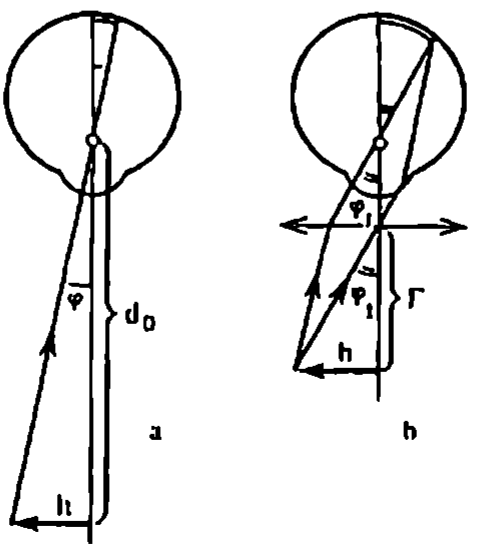


Fig. 177

no mayor de 10 cm). La lupa se sitúa generalmente cerca del ojo, y el objeto se coloca en el plano focal de la lente. En este caso los rayos de cualquier punto del objeto, después de emerger de la lupa, forman haces paralelos (fig. 177, *b*). Por consiguiente, la imagen nítida de los puntos sobre la retina se obtiene sin esforzar el ojo. En la lupa el objeto se ve bajo el ángulo

$$\varphi_1 = \frac{h}{F}.$$

Hallemos el aumento angular de la lupa

$$\Gamma = \frac{\varphi_1}{\varphi} \tag{6.19}$$

Para esto sustituyamos aquí φ_1 y φ por sus expresiones:

$$\Gamma = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F}. \tag{6.20}$$

Colocando el objeto más cerca que el plano focal, se puede obtener un aumento un poco mayor que cuando el objeto está en dicho plano. Pero esto requiere ya esfuerzo del ojo.

MICROSCOPIO. El aumento de la lupa es limitado, porque una distancia focal muy pequeña solo puede tenerla una lente de diámetro pequeño, cuyo empleo es difícil. Un aumento mayor se puede conseguir utilizando otra lente más. Esta segunda lente se llama *objetivo*. El objetivo produce una imagen real, aumentada, del objeto, la cual se observa después con la lupa, que en este caso recibe el nombre de *ocular*. El instrumento óptico que funciona según este esquema se denomina *microscopio*.

Para obtener la imagen real, aumentada, el objeto se coloca entre el foco del objetivo y un punto que se halla a una distancia igual al doble de la focal. La observación por el ocular conviene hacerla sin forzar el ojo. Para esto el ocular se sitúa de tal modo que la imagen que produce el objetivo se encuentre en el plano focal del ocular. La marcha de los rayos en el microscopio se representa en la fig. 178. En ella se muestran dos rayos que parten del punto A del objeto y crean la imagen real intermedia A_1. Cuando estos rayos inciden sobre la lente ocular, se refractan en ella y llegan al ojo formando un haz paralelo, que crea sobre la retina la imagen A_2. El microscopio da la posibilidad de distinguir detalles pequeños de los objetos, que observados a simple vista se confunden.

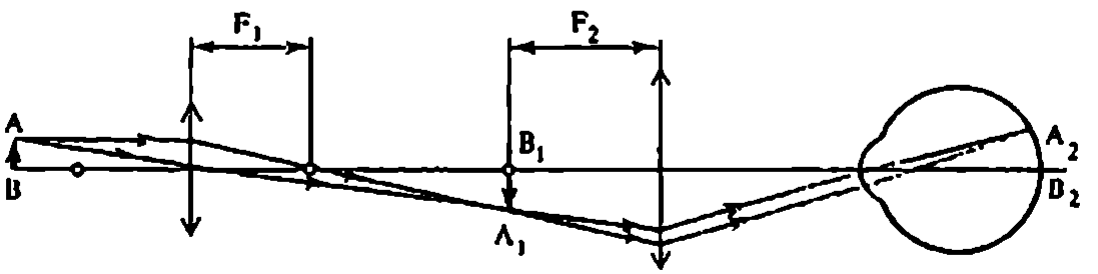


Fig. 178

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. En la fig. 179 se da la posición del eje óptico principal MN de una lente, la posición del punto luminoso S y de su imagen S_1. Hallar, por construcción, el centro óptico de la lente y sus focos. Determinar si la lente es convergente o divergente y si la imagen es real o virtual.

Solución. El rayo que pasa por el centro óptico de la lente no se desvía de su dirección. Por lo tanto, el centro óptico O coincide con el punto de intersección de las rectas SS_1 y MN (fig. 180). Se traza el rayo SK paralelo al eje óptico principal. El rayo refractado KS_1 pasa por el foco. Sabiendo que el rayo que incide sobre la lente pasando por el foco sale paralelo al eje óptico principal, hallamos el segundo foco. La lente es convergente y la imagen, real.

PROBLEMA 2. La imagen del objeto en la diapositiva tiene la altura $h = 2$ cm. ¿Qué distancia focal F debe tener el objetivo del aparato de proyección, situado a la distancia $f = 4$ m de la pantalla, para que la imagen del objeto indicado tenga en la pantalla la altura $H = 1$ m?

Solución. Por la fórmula

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

hallamos la distancia focal:

$$F = \frac{df}{d+f}.$$

El aumento de la lente se expresa así:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

De donde

$$d = \frac{hf}{H}.$$

Por lo tanto

$$F = \frac{hf}{H+h} \approx 8 \text{ cm}.$$

PROBLEMA 3. Determinar la potencia óptica de los lentes de un hipermétrope para el cual la distancia de visión óptima $d = 1$ m. La distancia de visión óptima del ojo normal considérese que es $d_0 = 0{,}25$ m.

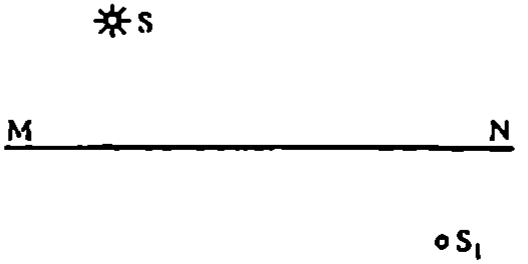


Fig. 179

Fig. 180

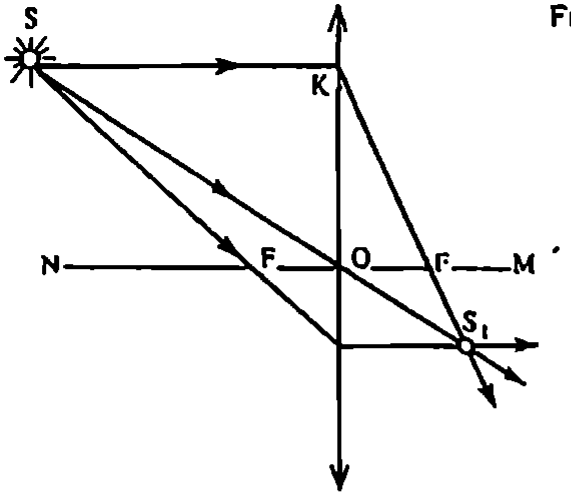
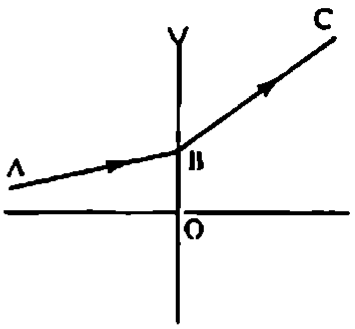


Fig. 181



Solución. Observando a través de los lentes un objeto situado a la distancia d_0, el hipermétrope ve su imagen virtual, que se encuentra a la distancia d del ojo (véase la fig. 176, *c*).

Aplicando la fórmula de la lente y despreciando la distancia de los lentes al ojo, hallamos

$$D = \frac{1}{l} = \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d} = \frac{d - d_0}{d_0 d} = 3 \text{ dptr.}$$

Ejercicio 9

1. La imagen de la división milimétrica de una escala, colocada delante de una lente a la distancia $d = 12{,}5$ cm, tiene en la pantalla la longitud $L = 2{,}4$ cm. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
2. Por medio de una lente se obtiene en la pantalla la imagen real de una lámpara eléctrica. ¿Cómo variará la imagen si se tapa la mitad derecha de la lente?
3. Una cámara fotográfica crea sobre la película la imagen del rostro de una persona. Explique, valiéndose de un dibujo, por qué la imagen del bosque que se divisa a lo lejos, detrás de la persona, no es nítida. ¿Hacia qué parte habría que desplazar el objetivo para que la imagen del bosque fuera nítida? ¿Sería nítida la imagen del rostro en este caso?
4. ¿Por qué un buceador sin careta protectora ve mal los objetos debajo del agua?
5. Construya la imagen de un objeto situado delante de una lente convergente en los casos siguientes: 1) $d > 2F$; 2) $d = 2F$; 3) $F < d < 2F$ y 4) $d < F$.
6. En la fig. 181 la línea ABC representa la marcha de un rayo a través de una lente divergente delgada. Determine, por construcción, la posición de los focos principales de la lente.
7. Un objeto se encuentra a la distancia $d = 1{,}8$ m de una lente convergente. Determine la distancia focal de la lente si la imagen es 5 veces menor que el objeto.
8. En la fig. 182 se muestra el eje óptico principal de una lente, un punto luminoso y su imagen. Halle, por construcción, el centro y los focos de la lente. ¿Qué clase de lente es ésta, convergente o divergente? ¿Es real o virtual la imagen? Considere los casos: 1) A es el punto luminoso y B su imagen; 2) B es el punto luminoso y A su imagen.
9. Construya la imagen de un punto luminoso, que produce una lente divergente, utilizando los tres rayos "más convenientes"

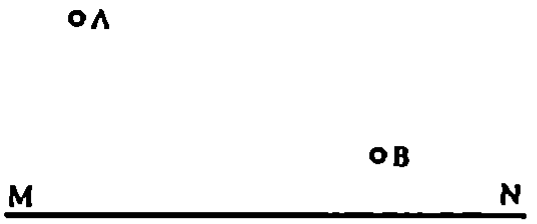


Fig. 182

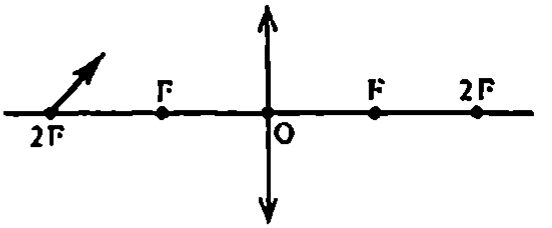


Fig. 183

10. La distancia focal del objetivo de una linterna de proyección es $F = 0{,}25$ m. ¿Qué aumento Γ de la diapositiva proporciona la linterna si la pantalla se encuentra a la distancia $f = 2$ m del objetivo?
11. Un punto luminoso se encuentra en el foco de una lente divergente ¿A qué distancia de la lente estará la imagen? Construya la marcha de los rayos.
12. Construya la imagen que, de una flecha corta inclinada hacia el eje óptico, produce una lente convergente. El extremo inferior de la flecha está en el eje óptico principal a una distancia de la lente igual al doble de la distancia focal de ésta (fig. 183).
13. Un alumno se quita sus gafas y lee un libro manteniéndolo a la distancia $d = 16$ cm de los ojos. ¿Qué potencia óptica tienen sus lentes?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 6

La luz es una onda electromagnética. Si la longitud de la onda luminosa es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos, que encuentra en su camino de propagación, es, con suficiente exactitud, correcta la descripción de los fenómenos por los métodos de la óptica geométrica. El concepto fundamental de la óptica geométrica es el de rayo de luz como línea que indica la dirección en que se propaga la energía luminosa. En un medio homogéneo la luz se propaga rectilíneamente.

Los métodos de medición de la energía luminosa se estudian en la fotometría. Los conceptos fundamentales de la fotometría son: el de flujo luminoso, el de intensidad de la luz y el de iluminación (o iluminancia).

Se llama flujo luminoso Φ la energía luminosa, apreciada por la sensación visual que produce, que en la unidad de tiempo pasa a través de una superficie dada.

Recibe el nombre de intensidad de la luz I de un foco o fuente la razón del flujo luminoso Φ, que crea dicha fuente en un ángulo sólido Ω, a este mismo ángulo sólido:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

La iluminación E es la razón del flujo luminoso Φ, que incide sobre una porción determinada de superficie, al área S de dicha porción de superficie:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

La iluminación se determina por la fórmula

$$E = \frac{I}{R^2}\cos\alpha,$$

en la que I es la intensidad de la luz del foco puntual; R, la distancia desde el foco de luz hasta la superficie iluminada; α, el ángulo de incidencia de los rayos sobre la superficie. La intensidad de la luz se mide en candelas; el flujo luminoso, en lúmenes; la iluminación, en lux

Las leyes fundamentales de la óptica geométrica son: la ley de la propagacion rectilínea de la luz en un medio homogéneo, la ley de la reflexión y la ley de la refracción.

Según la ley de la reflexión, el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular al límite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia del rayo, están en un mismo plano y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. La ley de la reflexión permite comprender de qué modo se producen las imágenes de los objetos en un espejo.

La ley de la refracción se enuncia como sigue: el rayo incidente, el rayo refractado y la perpendicular al límite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia del rayo, están en un mismo plano y la razón del seno del ángulo de incidencia α al seno del ángulo de refracción β es una magnitud constante para dos medios dados:

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = n,$$

siendo n el índice de refracción

Cuando la luz pasa de un medio ópticamente más denso a otro menos denso se observa la reflexión total. Esto ocurre cuando el ángulo de incidencia α es mayor que el ángulo límite α_0 que se determina de la condición

$$\operatorname{sen}\alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

Tienen gran importancia las lentes, que son cuerpos transparentes limitados por superficies esféricas. Las lentes pueden ser convergentes y divergentes.

Si un haz de rayos paralelos incide sobre una lente convergente, se concentra después en un punto llamado foco de la lente. Un haz de rayos paralelos que incida sobre una lente divergente, divergerá después de tal modo que las prolongaciones de los rayos, en sentido contrario al de su propagación, se reunirán en un punto. Este punto también se llama foco, pero en este caso es virtual. La fórmula fundamental de la lente relaciona su distancia focal F (distancia desde la lente hasta su foco) con la distancia d desde el objeto hasta la lente y con la distancia f desde la lente hasta la imagen:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

Las magnitudes F, f y d que figuran en la fórmula pueden ser tanto positivas como negativas. son positivos los valores correspondientes a un foco, una imagen y un objeto reales, y negativos, los correspondientes a un foco, una imagen y objeto virtuales.

En las leyes de la óptica geométrica se basa la estructura y el funcionamiento de muchos instrumentos ópticos, como la lupa, la cámara fotográfica, el aparato de proyección, el microscopio y el telescopio. Estas leyes dan la posibilidad de comprender la acción del ojo como sistema óptico.

7 ONDAS LUMINOSAS

7.1. Velocidad de la luz

En la *óptica geométrica* sólo se estudia la dirección de los rayos luminosos. El problema de cómo transcurre la propagación de la luz con el tiempo rebasa los límites de dicha óptica. Las propiedades de la luz y su interacción con la sustancia se estudia con mayor profundidad en la *óptica física*. Damos comienzo a esta parte de la física explicando cómo se midió la velocidad de la luz

Cuando pulsamos el interruptor de corriente, toda la habitación se llena de luz en el acto. Parece que la luz no necesita tiempo alguno para llegar hasta las paredes Los intentos hechos para medir la velocidad de la luz han sido muchos. Primero se hizo la prueba de medir con relojes exactos la velocidad de propagación de una señal luminosa a gran distancia (de varios kilómetros). Pero estos experimentos no dieron resultado. Se empezó a pensar que la luz, para propagarse, no necesita tiempo en absoluto, que la luz recorre distancias cualesquiera instantáneamente. Sin embargo, resultó que la velocidad de la luz no es infinita y por fin pudo ser medida.

MÉTODO ASTRONÓMICO DE MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ. La velocidad de la luz consiguió medirla, por vez primera, el científico danés O ROEMER en 1676. Roemer era astrónomo y su éxito se explica precisamente porque las distancias recorridas por la luz, que él utilizó para sus mediciones, eran muy grandes. Eran distancias entre planetas del sistema solar

Roemer se dedicó a observar los eclipses de los satélites de Júpiter, el más grande de los planetas del sistema solar. Júpiter, a diferencia de la Tierra, tiene nada menos que trece satélites. El satélite más próximo a él, Io, constituyó el objeto de las observaciones de Roemer. Éste vio cómo el satélite pasaba por delante del planeta y luego se inmergía en su sombra, desapareciendo del campo visual Después volvía a aparecer como si fuera una lámpara que se enciende instantáneamente El intervalo de tiempo entre dos de estos destellos era igual a 42 h 28 min. Por lo tanto, esta "luna" era una especie de reloj celeste enorme que al cabo de intervalos de tiempo iguales enviaba sus señales a la Tierra.

Las primeras mediciones se hicieron cuando la Tierra, en su movimiento alrededor del Sol, estaba en su posición más próxima a Júpiter (fig. 184). Las mismas medidas hechas varios meses después, cuando la Tierra se había alejado de Júpiter, dieron por resultado que el satélite se había retrasado 22 min en emerger de la sombra, en comparación con el instante que se podía calcular basándose en el conocimiento del período de rotación de Io.

Roemer explicó esto así: "Si yo hubiera podido permanecer en la otra parte de la órbita de la Tierra, el satélite habría emergido de la sombra cada vez a la

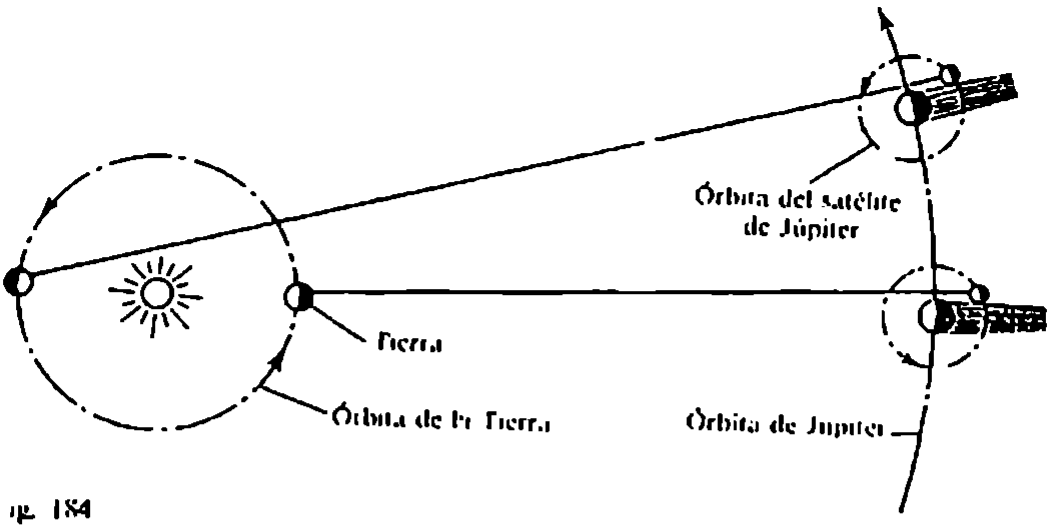


Fig. 184

hora fijada; un observador que se encontrara allí hubiera visto a Io 22 min antes. El atraso tiene lugar, en este caso, porque la luz tarda 22 min en recorrer la distancia desde el punto en que yo hice la primera observación hasta mi posición actual". Conociendo el retraso de Io en aparecer y la distancia a que esto se debe, se puede determinar la velocidad de la luz, dividiendo esta distancia por la duración del retraso. La velocidad de la luz resultó ser extraordinariamente grande: cerca de 300 000 km/s [1]. Ésta es la causa por la que es tan difícil apreciar el tiempo que tarda la luz en propagarse entre dos puntos de la Tierra lejanos, ya que en un segundo recorre la luz una distancia 7,5 veces mayor que la longitud del ecuador de la Tierra.

MÉTODOS DE LABORATORIO PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ. Utilizando un método de laboratorio, la velocidad de la luz por vez primera fue medida por el físico francés H. L. FIZEAU en el año 1849. El procedimiento utilizado consistía en hacer pasar la luz entre los dientes de una rueda en rotación (fig. 185). Luego la luz incidía sobre un espejo que estaba a varios kilómetros de la rueda. Una vez reflejada en el espejo la luz debía pasar otra vez por entre los dientes de la rueda. Cuando ésta giraba lentamente, la luz reflejada en el espejo se veía. Al ir aumentando la velocidad de rotación, la luz iba desapareciendo poco a poco. ¿A qué se debía esto? Mientras la luz, después de pasar por entre dos dientes iba hasta el espejo y volvía, la rueda tenía tiempo de girar de tal modo que el lugar del hueco lo ocupaba un diente y la luz dejaba de verse.

Si la velocidad de rotación seguía aumentando, la luz volvía a verse. Es evidente que durante el tiempo en que la luz se propagaba hasta el espejo y volvía, la rueda giraba lo suficiente para que el lugar del hueco anterior lo ocupara el hueco siguiente. Conociendo este tiempo y la distancia entre la rueda y el espejo se puede determinar la velocidad de la luz. En el experimento de

[1] A causa de la inexactitud de las medidas y de que el radio de la órbita de la Tierra no se conocía aún con precisión, Roemer obtuvo para la velocidad de la luz el valor de 215 000 km/s.

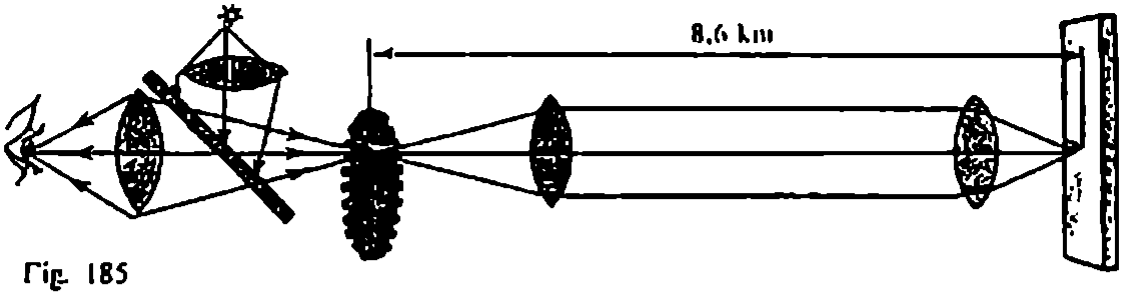


Fig. 185

Fizeau la distancia era de 8,6 km y para la velocidad de la luz se obtuvo el valor de 313 000 km/s.

Se estudiaron otros muchos métodos de laboratorio más exactos para medir la velocidad de la luz. En particular, el físico norteamericano A. A. Michelson elaboró un método perfeccionado para medir la velocidad de la luz utilizando, en vez de una rueda dentada, unos espejos giratorios.

También se midió la velocidad de la luz en diversas sustancias transparentes. En el agua fue medida en 1856. Resultó ser 4/3 veces menor que en el vacío. En las demás sustancias también es menor que en el vacío.

Según los datos más modernos, la velocidad de la luz en el vacío es igual a (299 792 456,2 ± 0,8) m/s.

La determinación de la velocidad de la luz desempeñó un papel muy importante en la ciencia. Contribuyó en alto grado a establecer la naturaleza de la luz. La velocidad de la luz tiene especial importancia porque ningún cuerpo puede tener una velocidad superior a la de la luz en el vacío. Esto se puso de manifiesto después de haber sido creada la teoría de la relatividad, de la cual se tratará en el capítulo siguiente.

7.2 Deducción de la ley de la refracción de la luz

El concepto fundamental de la óptica geométrica es el de rayo de luz. Las leyes que determinan la dirección de los rayos luminosos – la ley de la propagación rectilínea en un medio homogéneo y las leyes de la reflexión y de la refracción – fueron descubiertas por vía experimental.

Teóricamente las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz se dedujeron, por primera vez, valiéndose de la teoría ondulatoria de la luz, propuesta por Huygens. Éste consideraba la luz como ondas elásticas que se propagan en un medio hipotético, el éter, que llena todo el espacio universal.

El principio de Huygens, del que se trató en el cuarto capítulo, dedicado a las ondas mecánicas, fue enunciado inicialmente para las ondas luminosas.

Este principio, como las demás leyes del movimiento ondulatorio, es correcto para todas las ondas, independientemente de cuál sea su naturaleza.

En el § 4.10 se introdujo la ley de la reflexión para las ondas mecánicas. Pero como todos aquellos razonamientos son aplicables con exactitud a las ondas luminosas, se puede considerar de inmediato que la ley de la reflexión de la luz está ya demostrada teóricamente.

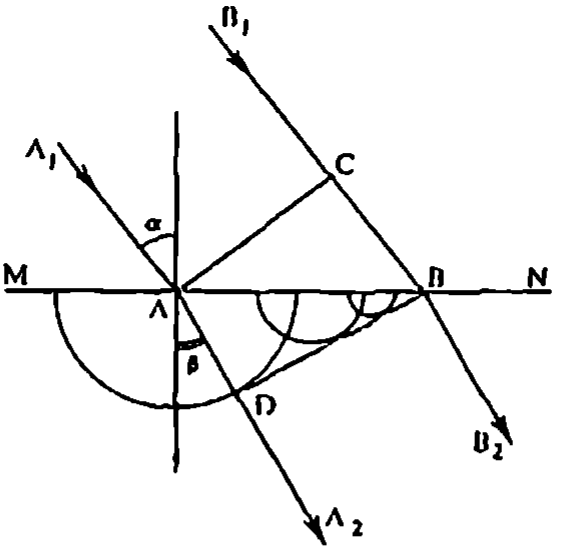


Fig. 186

Vamos ahora a considerar la refracción de la luz al pasar de un medio a otro. Supongamos que sobre el límite de separación de dos medios, por ejemplo, el aire y el agua, incide una onda luminosa plana (fig. 186). La superficie de onda AC es perpendicular a los rayos A_1A y B_1B. A la superficie MN llega primero el rayo A_1A. Si la velocidad de la luz en el primer medio es v_1, el rayo B_1B llegará a la superficie MN al cabo del tiempo

$$\Delta t = \frac{|CB|}{v_1}.$$

Por eso en el instante en que en el punto B la onda secundaria sólo empieza a excitarse, la onda procedente del punto A tiene ya la forma de una esfera de radio

$$|AD| = v_2 \ \Delta t,$$

donde v_2 es la velocidad de la luz en el segundo medio. La superficie de la onda refractada puede obtenerse haciendo pasar una superficie tangencialmente a todas las ondas secundarias en el segundo medio, cuyos centros se encuentran en el límite de separación. En nuestro caso la superficie tangencial es el plano BD. Este plano es la envolvente de las ondas secundarias.

El ángulo de incidencia α del rayo es, evidentemente, igual al ángulo CAB del triángulo ABC (por ser los lados de uno de estos ángulos perpendiculares a los lados del otro). Por consiguiente,

$$|CB| = v_1 \cdot \Delta t = |AB| \operatorname{sen} \alpha \qquad (7.1)$$

El ángulo de refracción β es igual al ángulo ABD del triángulo ABD. Por lo que

$$|AD| = v_2 \cdot \Delta t = |AB| \operatorname{sen} \beta. \qquad (7.2)$$

Dividiendo (7.1) por (7.2) se obtiene la ley de la refracción:

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \qquad (7.3)$$

en la que n es una magnitud constante que no depende del ángulo de incidencia. Esta magnitud, como ya se sabe, recibe el nombre de *índice de refracción relativo*. Así, pues, del principio de Huygens no sólo se sigue la ley de la refracción, sino que con su ayuda se pone de manifiesto el sentido físico del índice de refracción relativo. Éste es igual a la razón de las velocidades de la luz en los medios en cuyo límite de separación se produce la refracción:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \tag{7.4}$$

Si el ángulo de refracción β es menor que el de incidencia α, de acuerdo con (7.3), la velocidad de la luz en el segundo medio es menor que en el primero. Esto se confirmó plenamente en los experimentos de medición de la velocidad de la luz en el agua y en otros medios transparentes.

Aplicando la fórmula (7.4) puede expresarse el índice de refracción relativo n por medio de los índices de refracción absolutos n_1 y n_2 de los medios primero y segundo. En efecto, como

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ y } n_2 = \frac{c}{v_2},$$

resulta que

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{7.5}$$

7.3. Dispersión de la luz

El índice de refracción no depende del ángulo de incidencia del haz, pero sí depende de su color. Esto fue descubierto por el sabio inglés Newton.

Cuando se ocupaba del perfeccionamiento de los telescopios, Newton observó que la imagen que daba el objetivo tenía los bordes coloreados. Se interesó por este fenómeno y fue el primero que "investigó la diversidad de rayos luminosos y las peculiaridades de los colores que de esto se infieren y que hasta entonces nadie había ni siquiera sospechado" (del epitafio en el sepulcro de Newton). La coloración irisada de la imagen que da una lente había sido observada sin duda antes de Newton. También se había notado que tienen los bordes irisados los objetos que se miran a través de un prisma. El haz de rayos luminosos que pasa a través del prisma se colorea por los bordes.

El experimento fundamental de Newton fue genialmente sencillo. Acertó a dirigir sobre un prisma un haz luminoso de sección transversal *pequeña*. El haz de luz solar entraba en una sala oscura a través de un pequeño orificio practicado en el postigo de la ventana. Al incidir sobre el prisma de vidrio, el haz se refractaba y producía sobre la pared opuesta una imagen alargada en la que se sucedían los colores del iris (fig. 187). Siguiendo la tradición secular, según la cual el arco iris se consideraba formado por siete colores principales,

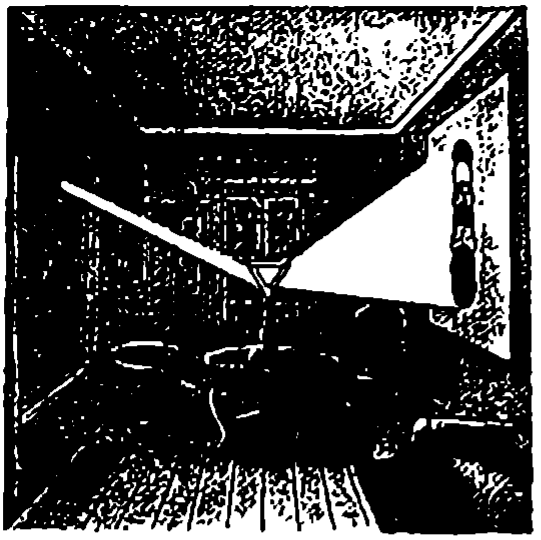
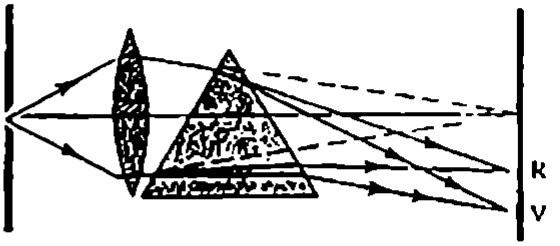


Fig. 187

Fig. 188



Newton también aisló siete colores: violado, añil, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo. A la franja coloreada Newton le dio el nombre de *espectro*.

Tapando el orificio con un vidrio rojo, Newton sólo veía en la pared una mancha roja; tapándolo con un vidrio azul, solo una azul y así sucesivamente. De esto deducía que no era el prisma el que coloreaba la luz blanca, como se suponía antes. El prisma no cambia la luz, lo único que hace es descomponerla en sus partes integrantes (véase la fig. I de las láminas en color). La luz blanca tiene una estructura compleja. De ella se pueden separar haces de distintos colores y únicamente la acción conjunta de éstos nos produce la sensación de luz blanca. Efectivamente si con un segundo prisma, vuelto 180° con respecto al primero, se recogen todos los haces del espectro, otra vez se obtiene luz blanca (véase la fig. II de las láminas en color). Si se aísla una parte cualquiera del espectro, por ejemplo, la verde, y se hace pasar su luz otra vez por un prisma, ya no se obtienen más variaciones del color.

Otra conclusión importante a que llegó Newton fue enunciada por él en su tratado de "Óptica" como sigue: "Los rayos luminosos que se diferencian por su color, también se diferencian por su grado de refracción" (para ellos el vidrio tiene distintos índices de refracción). Los rayos que más intensamente se refractan son los violetas, y los que menos, los rojos. *La dependencia del índice de refracción de la luz del color de ésta recibe el nombre de dispersión* (del latín "dispergere", esparcir).

Más tarde Newton perfeccionó sus observaciones del espectro para obtener colores más puros, ya que las manchas de colores redondas del haz que pasaba por el prisma se superponían unas a otras parcialmente (véase la fig. 187). En vez de un orificio redondo utilizó una rendija estrecha iluminada por una fuente muy brillante. Detrás de la rendija puso una lente que daba sobre la pantalla una imagen en forma de franja blanca estrecha. Si en el camino de los rayos se interponía un prisma (fig. 188), la imagen de la rendija se extendía formando el espectro.

Como el índice de refracción depende de la velocidad de la luz en la sustancia, es evidente que la luz roja, que es la que menos se refracta, tiene la

mayor velocidad, y la violeta, la menor. Precisamente por eso el prisma descompone la luz. En el vacío las velocidades de los rayos de distinto color son iguales. Si no fuera así ocurriría que, por ejemplo, el satélite de Júpiter, Io, que observó Roemer, parecería rojo en el instante en que emerge de la sombra y violeta antes de sumergirse en ella. Pero esto no se observa.

Sabiendo que la luz blanca tiene estructura compleja se puede explicar la extraordinaria variedad de colores que existe en la naturaleza. Si un objeto, por ejemplo, una hoja de papel, refleja todos los rayos de distintos colores que inciden sobre él, parecerá blanco. Si el papel se recubre con una capa de pintura roja, con ello no se crea luz de un color nuevo, pero la hoja retiene una parte de la luz existente. Ahora sólo se reflejarán los rayos rojos, los demás serán absorbidos por la capa de pintura. La hierba y las hojas de los árboles parecen verdes porque de todos los rayos solares que inciden sobre ellas sólo se reflejan los verdes, los demás son absorbidos. Si la hierba se mira a través de un vidrio rojo, que sólo deja pasar los rayos rojos, parecerá casi negra.

¿ ?

1 ¿Qué sentido físico tiene el índice de refracción de la luz?
2 En un cuaderno está escrito con lápiz rojo la palabra "sobresaliente" y con lápiz verde "notable". Se dispone de dos vidrios: uno verde y el otro rojo. ¿A través de cuál de ellos deberá mirarse para ver la calificación de "sobresaliente"?
3 ¿Por qué sólo un haz luminoso estrecho produce el espectro después de atravesar un prisma, mientras que si el haz es ancho resultan coloreados únicamente sus bordes?

7.4. Interferencia de la luz

Pasamos a estudiar los fenómenos que demuestran que la luz está constituida por ondas. Como ya se ha dicho, los fenómenos de la interferencia y la difracción son propios de todo movimiento ondulatorio. De que la luz al propagarse pone de manifiesto propiedades ondulatorias nos persuade la observación de la *interferencia* y *difracción* de la luz.

INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS. La interferencia de la luz fue observada hace ya mucho tiempo, pero no se le prestó atención. De niños todos hemos visto las figuras de interferencia cuando nos recreábamos en hacer pompas de jabón o mirábamos las manchas irisadas, de petróleo o gasolina, que flotan en la superficie del agua. "La pompa de jabón, suspendida en el aire...se ilumina con todos los matices de los colores peculiares de los objetos que la rodean. La pompa de jabón es, sin duda, la maravilla más delicada de la naturaleza" (Mark Twain). Precisamente la interferencia de la luz hace que la pompa de jabón sea tan digna de admiración.

El científico inglés Thomas Young fue el primero en concebir la idea de la posibilidad de explicar los colores de las películas delgadas por la composición de las ondas *1* y *2* (fig. 189), una de las cuales se refleja en la superficie exterior de la película y la otra, en la interior. Al ocurrir esto se produce *la interferencia de las ondas luminosas, es decir, la composición de las dos ondas, en virtud de la cual se observa una figura, estable con el tiempo, del reforzamiento o la atenuación de las oscilaciones luminosas resultantes en distintos puntos del espacio.* El resul-

Thomas Young (1773–1829), célebre científico inglés de talento multifacético, cuyo interés abarcó un margen extraordinario de problemas científicos. Fue al mismo tiempo médico famoso y físico de enorme intuición, astrónomo y mecánico, metalúrgico y egiptólogo, fisiólogo y poliglota, músico de talento y hasta gimnasta capaz. El mérito principal de Young es el haber descubierto la interferencia de la luz (a él se debe el término interferencia) y explicado el fenómeno de la difracción basándose en la teoría ondulatoria. Fue el primero en medir la longitud de la onda luminosa. Young estudió la deformación por cizallamiento e introdujo la característica cuantitativa de las propiedades elásticas de las sustancias sometidas a compresión o a tracción, llamada módulo de Young.

tado de la interferencia (reforzamiento o atenuación de las oscilaciones resultantes) depende del ángulo de incidencia de la luz sobre la película, del espesor de ésta y de la longitud de onda. El REFORZAMIENTO de la luz ocurrirá si la onda 2 refractada se retrasa de la onda reflejada 1 un número entero de longitudes de onda. Pero si la segunda onda se retrasa de la primera en una semilongitud de onda o en un número impar de semilongitudes de onda, se originará la ATENUACIÓN de la luz.

Para que al componerse las ondas se forme una figura de interferencia estable, éstas deben ser *coherentes*, es decir, deben tener la misma longitud y una diferencia de fase constante. La coherencia de las ondas reflejadas en las superficies exterior e interior de la película se consigue porque ambas son partes de un mismo haz luminoso. Las ondas emitidas por dos focos luminosos, independientes ordinarios no producen figura de interferencia porque la diferencia de fase de las dos ondas procedentes de dichos focos no es constante.

Young comprendió que la diferencia de color está relacionada con la diferencia de longitud de onda (o de frecuencia de las ondas luminosas). A los

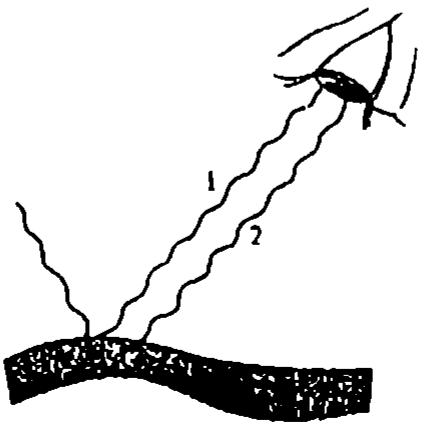


Fig. 189

flujos luminosos de distinto color corresponden ondas de diferente longitud Para que se refuercen mutuamente dos ondas que difieren entre sí por su longitud (suponiendo que los ángulos de incidencia son iguales) es necesario que el espesor de la película sea distinto. Por consiguiente, si la película tiene un espesor desigual, al iluminarla con luz blanca deben aparecer distintos colores.

Sabiendo de qué característica física de la onda luminosa depende el color, se puede dar una definición más profunda de la dispersión de la luz que la que se enunció en el párrafo precedente

Se llama dispersión la dependencia del índice de refracción de la luz respecto de la frecuencia de las oscilaciones (o de la longitud de onda).

ANILLOS DE NEWTON. Una figura de interferencia se produce en la delgada capa de aire que queda entre una lámina de vidrio y la superficie esférica, de gran radio de curvatura, de una lente plano-convexa colocada sobre ella. Esta figura de interferencia tiene la forma de anillos concéntricos y se conoce con el nombre de anillos de Newton

Si se pone una lente plano-convexa, cuya superficie esférica tenga poca curvatura, sobre una lámina de vidrio, como acabamos de indicar, y se mira con atención (preferiblemente con una lupa) la superficie plana de la lente, se verá que en el punto de contacto de la lente con la lámina hay una mancha oscura y alrededor de ella un conjunto de pequeños anillos concéntricos irisados. La distancia entre los anillos vecinos va disminuyendo rápidamente a medida que aumenta su radio (fig. III, 1 de las láminas en color). Esos son los anillos de Newton Éste los observó y analizó no sólo utilizando luz blanca, sino también iluminando la lente con haces de un solo color (monocromáticos) Resultó que los radios de los anillos que tienen el mismo número de orden aumentan al pasar del extremo violeta del espectro al rojo; los anillos rojos tienen el radio máximo (figs. III, 2 y III, 3 de las láminas en color). Cerciórese de esto repitiendo el experimento por su cuenta.

Newton no pudo dar una explicación satisfactoria del origen de estos anillos El primero que consiguió darla fue Young Vamos a seguir la marcha de sus razonamientos. Se basaron éstos en suponer que la luz está constituida por ondas. Consideremos el caso de una onda de longitud determinada que incide perpendicularmente sobre la lente plano-convexa (fig. 190). La onda *1* aparece como resultado de la reflexión en la superficie convexa de la lente en límite *vidrio – aire*, y la onda *2*, como resultado de la reflexión en la lámina en el límite *aire – vidrio* Estas ondas son coherentes, porque tienen la misma longitud y una diferencia de fase constante, que se origina a causa de que la onda *2* recorre un camino más largo que la onda *1*. Si la segunda onda se retrasa de la primera un número entero de longitudes de onda, al componerse, las ondas se refuerzan entre sí. Las oscilaciones que provocan están en la misma fase.

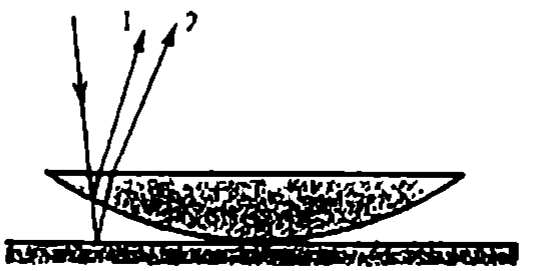


Fig. 190

Por el contrario, si la segunda onda retrasa de la primera un número impar de semilongitudes de onda, las oscilaciones que originan estarán en oposición de fase y las ondas se atenúan una a otra.

Conociendo el radio de curvatura R de la superficie de la lente, se puede calcular a qué distancias del punto de contacto de la lente con la lámina de vidrio las diferencias de marcha son tales que las ondas de una longitud λ determinada se atenúan entre sí. Estas distancias son los radios de los anillos de Newton oscuros, ya que las líneas de espesor constante de la capa de aire son circunferencias concéntricas. Midiendo los radios de los anillos se pueden calcular las longitudes de las ondas.

LONGITUD DE UNA ONDA LUMINOSA. Para la luz roja las mediciones dan que $\lambda = 8 \cdot 10^{-5}$ cm, y para la violeta, $\lambda_v = 4 \cdot 10^{-5}$ cm. Las longitudes de las ondas correspondientes a los otros colores del espectro tienen valores intermedios (véase la fig. V de las láminas en color). Cualquiera que sea el color, la longitud de la onda luminosa es muy pequeña. Imagínese que una ola del mar de varios metros de longitud se aumenta tanto que llega a ocupar todo el Océano Atlántico desde las costas de América hasta Europa. Pues si una onda luminosa se sometiera al mismo aumento, su longitud sería un poco mayor que la anchura de esta página.

El estudio de la interferencia no sólo demuestra que la luz tiene propiedades ondulatorias, sino que da también la posibilidad de medir la longitud de onda. Al mismo tiempo se pone en claro que, así como la altura del sonido se debe a su frecuencia, el color de la luz viene determinado por la frecuencia de las oscilaciones o por la longitud de onda (recuérdese que entre la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad existe la relación $\lambda\nu = c$).

Fuera de nosotros en la naturaleza no existen colores, sólo existen ondas de distinta longitud. El ojo humano es un instrumento físico complejo capaz de revelar la diferencia de color correspondiente a una diferencia insignificante (de cerca de 10^{-6} cm) de la longitud de las ondas luminosas. La mayoría de los animales no distinguen los colores. Ven siempre las imágenes en blanco y negro.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su longitud de onda varía. Esto se puede comprobar llenando de agua o de cualquier líquido transparente, cuyo índice de refracción sea n, el espacio que antes ocupaba la capa de aire entre la lente y la lámina de vidrio. En estas condiciones los radios de los anillos de interferencia disminuyen.

¿Por qué ocurre esto? Porque, como se sabe, cuando la luz pasa del vacío a cualquier medio, su velocidad disminuye n veces. Pero $v = \lambda\nu$, por lo que al mismo tiempo debe disminuir n veces la frecuencia o la longitud de onda. Mas los radios de los anillos dependen de la longitud de onda. Por consiguiente, cuando la luz entra en el medio varía n veces precisamente la longitud de onda, y no la frecuencia.

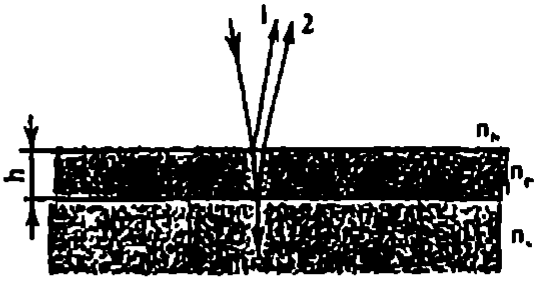
7.5. Algunas aplicaciones de la interferencia

La interferencia tiene aplicaciones muy importantes y extendidas.

Existen aparatos especiales, llamados *interferómetros*, cuyo funcionamiento se basa en el fenómeno de la interferencia. Su utilización puede ser muy diversa:

Fig. 192

Fig. 191



para medir con exactitud la longitud de las ondas luminosas y el índice de refracción de los gases y de otras sustancias Hay interferómetros para fines especiales.

Vamos a detenernos únicamente en dos aplicaciones de la interferencia

COMPROBACIÓN DE LA CALIDAD DEL ACABADO DE LAS SUPERFICIES Valiéndose de la interferencia se puede apreciar la calidad del acabado de las superficies de las piezas con exactitud de hasta 1/10 de longitud de onda, es decir, de hasta 10^{-6} cm. Para esto hay que crear una delgada capa cuneiforme de aire entre la superficie de la muestra y una lámina patrón, de vidrio, muy lisa (fig. 191) Las rugosidades de la superficie de hasta 10^{-6} cm producen distorsiones de las franjas de interferencia que se originan al reflejarse la luz en la superficie que se comprueba y en la cara inferior de la lámina patrón.

ÓPTICA ANTIRREFLEJANTE Los objetivos de las modernas cámaras fotográficas y proyectores de cine, de los periscopios para los submarinos y de otros muchos dispositivos ópticos constan de un gran número de vidrios ópticos—lentes, prismas, etc. Al pasar a través de estos dispositivos la luz se refleja en muchas superficies. El número de superficies reflectoras que hay en los objetivos fotográficos modernos es mayor que 10 y en los periscopios de los submarinos llega hasta 40 Cuando la luz incide perpendicularmente sobre una superficie se refleja en ella de un 5 a un 9% de toda la energía. Por esta razón a través del aparato pasa a menudo sólo de un 10 a un 20% de la luz que a él llega. Como resultado se obtiene una iluminación muy pobre de la imagen También empeora la calidad de la propia imagen. Una parte del haz luminoso, después de reflejarse muchas veces en las superficies interiores, pasa a través del dispositivo óptico, pero se dispersa y no contribuye a formar una imagen nítida. Ésta es la causa del "velo" de las imágenes fotográficas.

Para evitar las consecuencias desagradables de la reflexión de la luz en las superficies de los vidrios ópticos es necesario disminuir el índice de reflexión. Con esto la imagen que da el aparato se hace más clara De aquí que la óptica antirreflejante se llame también "*óptica clarificada*".

La "clarificación" de la óptica se basa en la interferencia. Sobre la superficie del vidrio óptico, por ejemplo, de la lente, se deposita una película delgada cuyo índice de refracción n_p es menor que el índice de refracción n_{vid} del vidrio. Para simplificar vamos a examinar el caso en que la luz incide normalmente sobre la película

La diferencia de marcha de las ondas *1* y *2* (fig. 192) reflejadas, respectivamente, en las superficies superior e inferior de la película es igual al doble del espesor de ésta, es decir, a $2h$. La longitud de la onda λ_p en la película

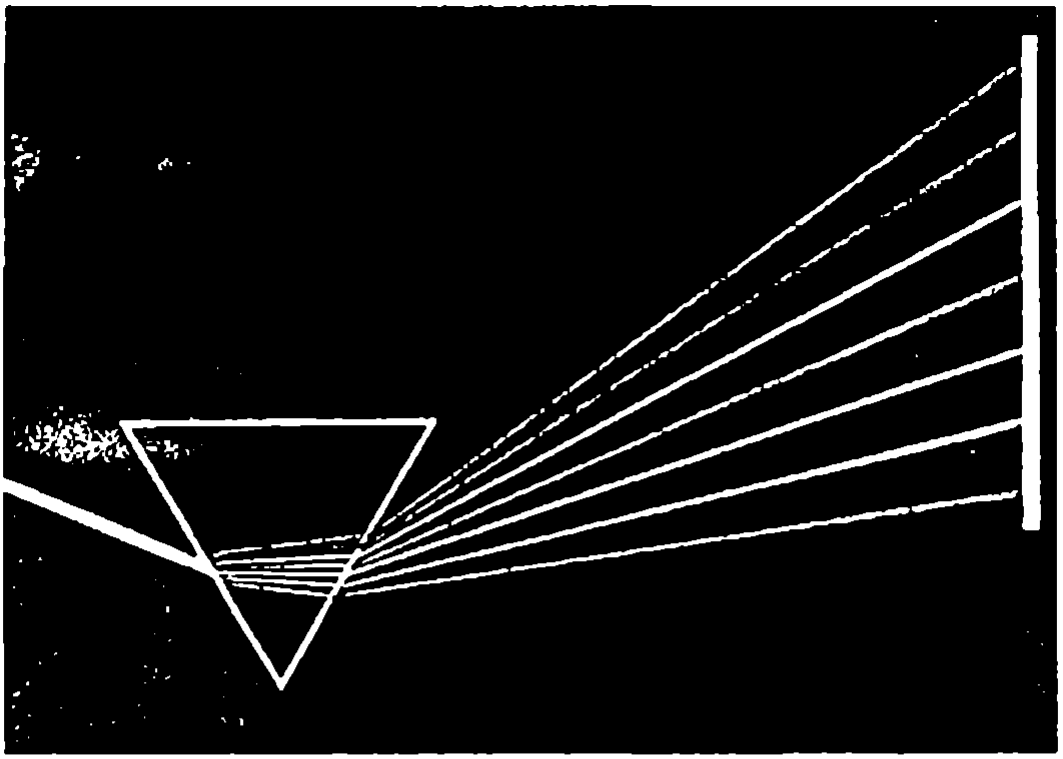


Fig. I Esquema de la descomposición de la luz blanca en el espectro por medio de un prisma

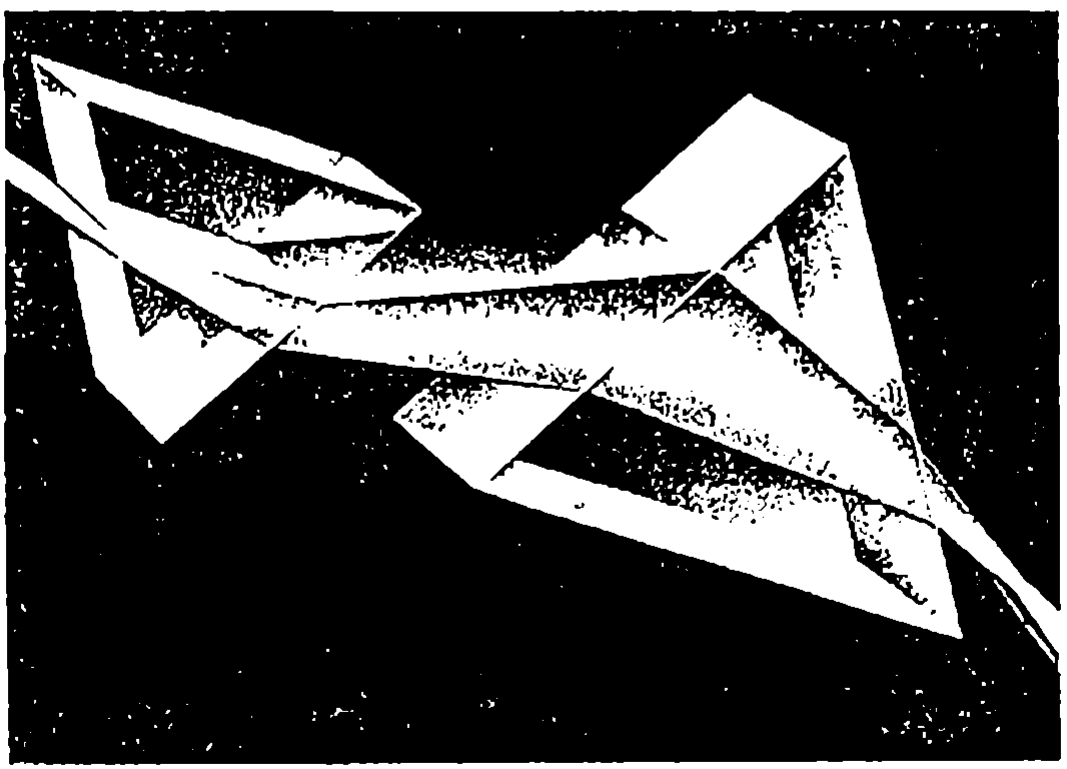


Fig. II Descomposición y síntesis de la luz blanca por medio de prismas

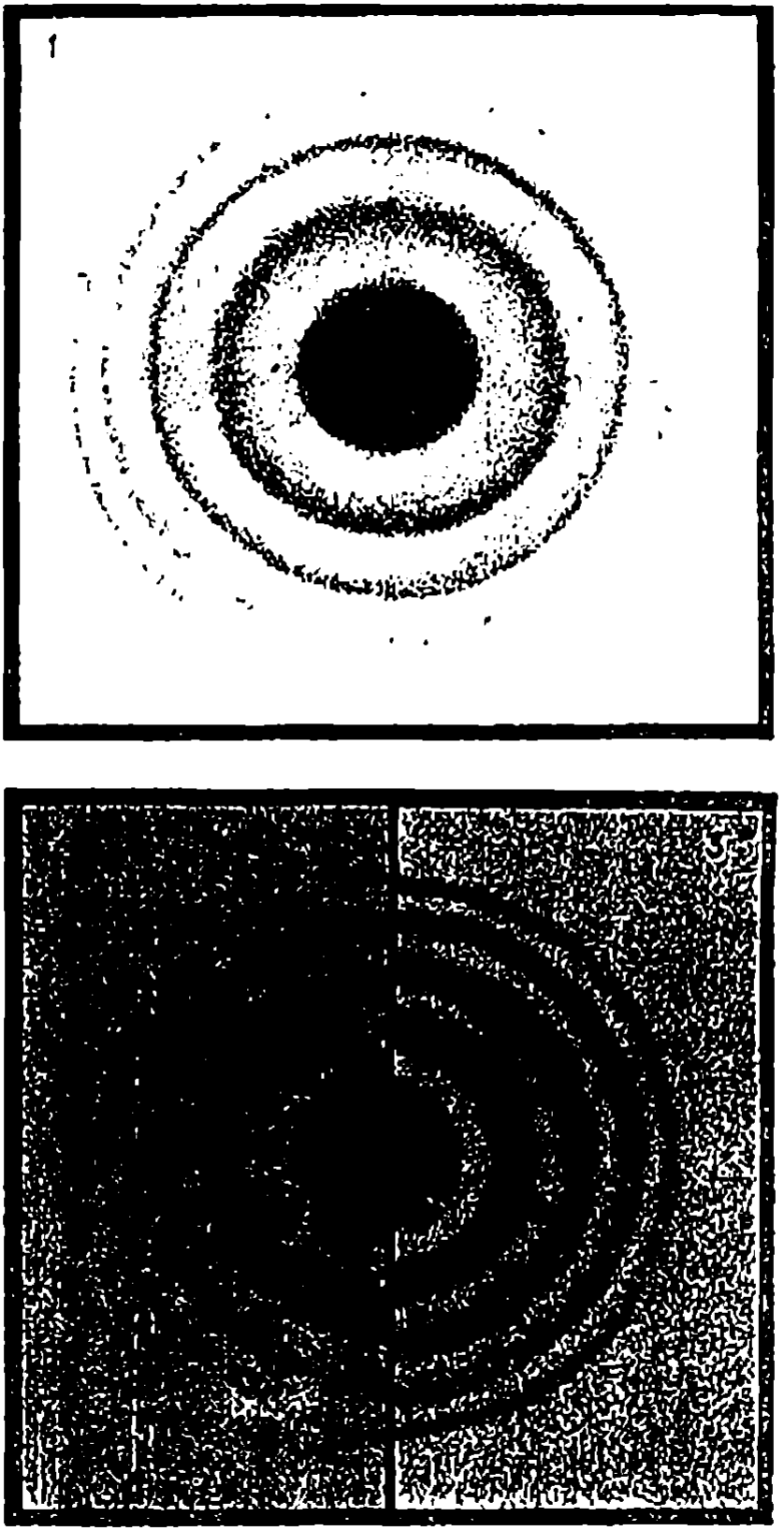


Fig. III Anillos de Newton a la luz reflejada 1 blanca 2, roja 3 verde

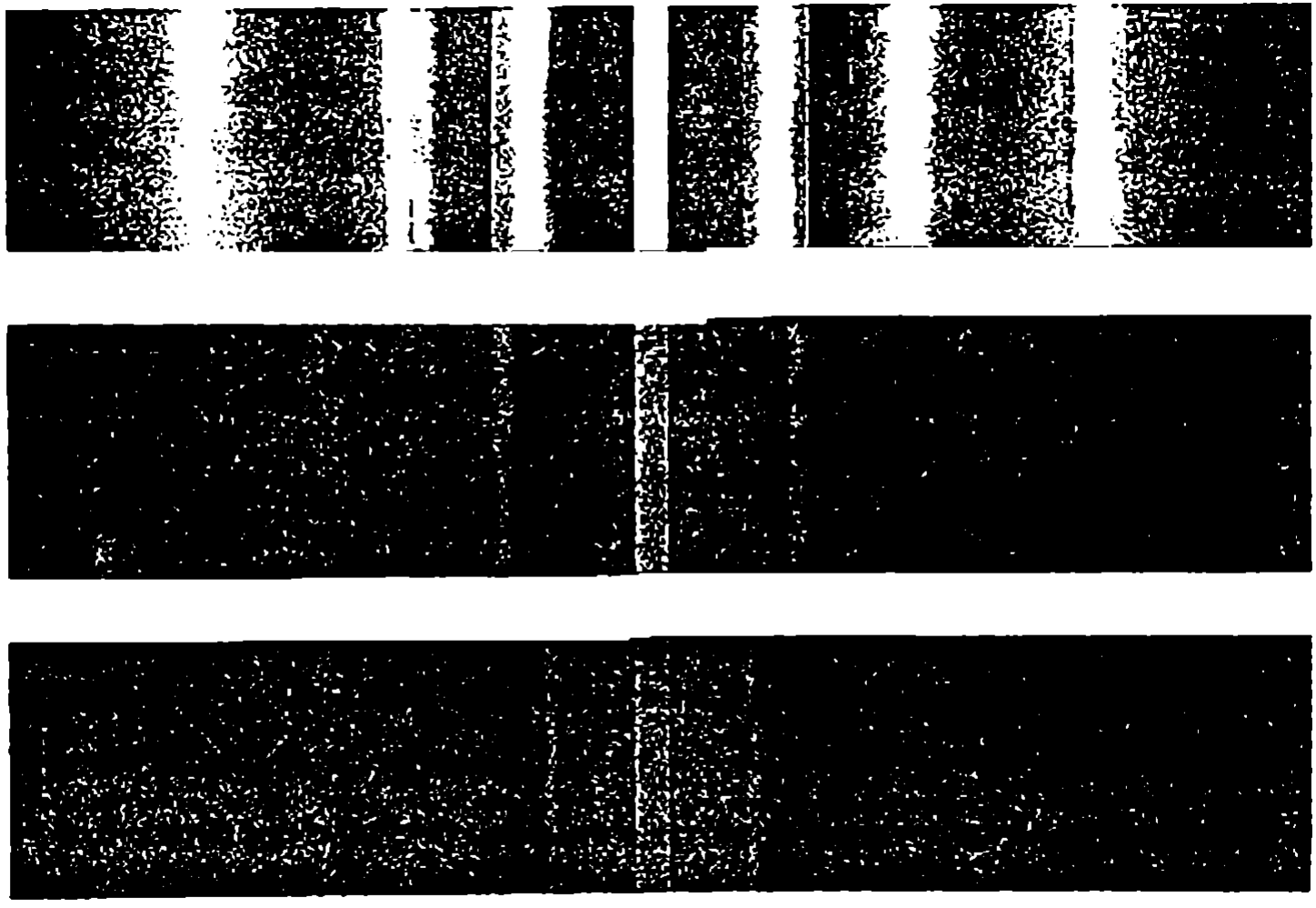


Fig. IV Espectros obtenidos con una red de difraccion 1 de la luz blanca 2 de la luz roja monocromática 3, de la luz violeta monocromática (La numeracion va de arriba abajo)

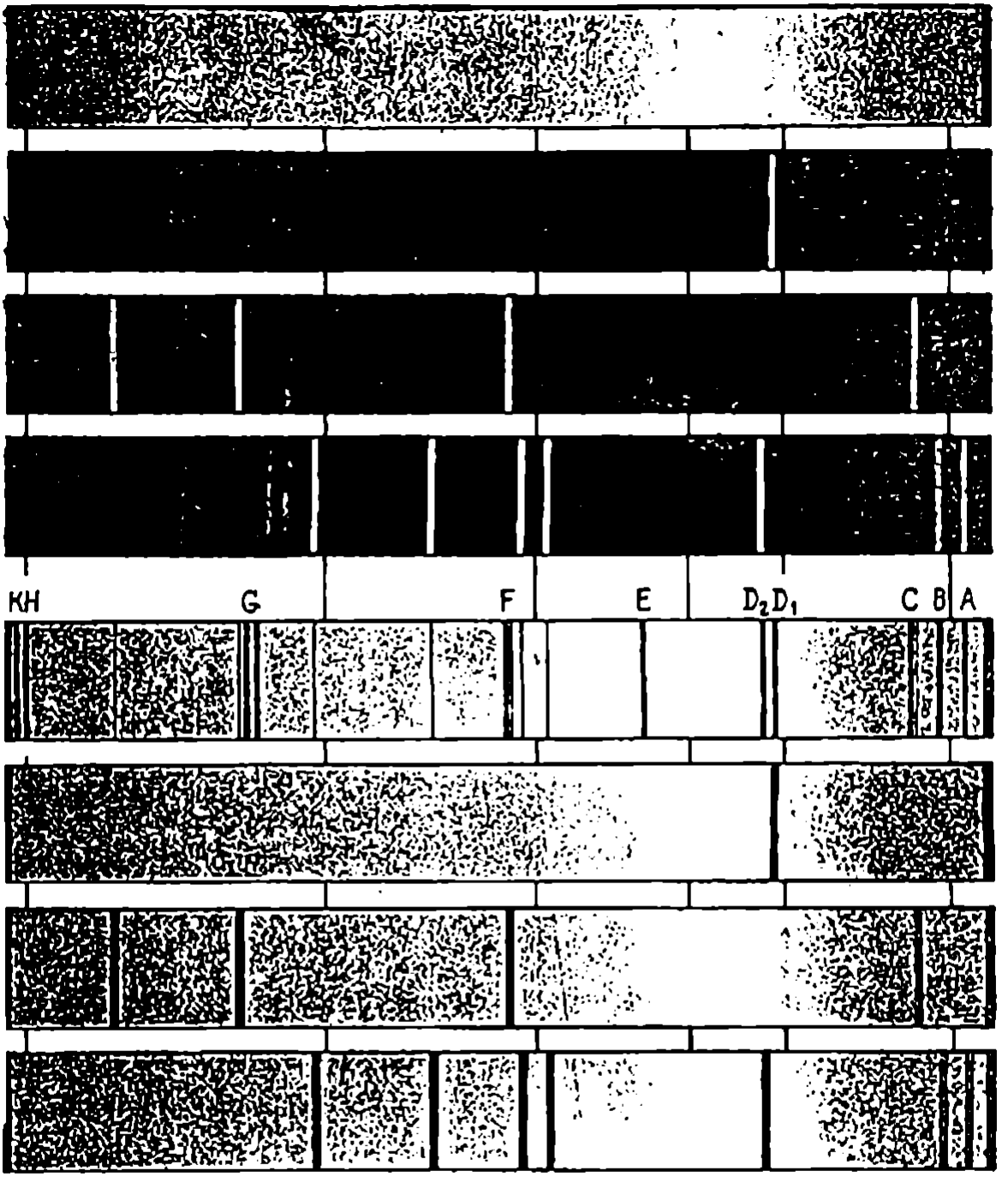


Fig. V. Espectros de emisión: 1, continuo; 2, del sodio; 3, del hidrógeno; 4, del helio. Espectros de absorción: 5, del Sol; 6, del sodio; 7, del hidrógeno; 8, del helio. (La numeración va de arriba abajo.)

es n_p veces menor que la longitud de onda λ en el vacío.

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{n_p}$$

Para que las ondas *1* y *2* se atenúen entre sí, la diferencia de marcha debe ser igual a la semilongitud de la onda en la película.

$$2h = \frac{\lambda}{2n_p}. \qquad (7.6)$$

Si las amplitudes de las dos ondas reflejadas son iguales o se aproximan mucho una a otra, la luz se extingue totalmente. Para conseguir esto se elige convenientemente el índice de refracción de la película, puesto que la intensidad de la luz reflejada depende de la razón de los coeficientes de reflexión de los medios colindantes

Sobre la lente, en las condiciones ordinarias, incide luz blanca. La expresión (7.6) muestra que el espesor necesario de la película depende da la longitud de onda. Por eso resulta imposible la extinción de las ondas reflejadas de todas las frecuencias El espesor de la película se elige de manera que, cuando la incidencia sea normal, se extingan totalmente las ondas cuyas longitudes corresponden a la parte media del espectro (luz verde, $\lambda_v = 5{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm); dicho espesor debe ser igual a la cuarta parte de la longitud de la onda en la película[1]:

$$h = \frac{\lambda_v}{4n_p}$$

La reflexión de la luz de las partes extremas del espectro – roja y violeta – se atenúa muy poco. Por eso los objetivos antirreflejantes tienen a la luz refleja un matiz lila Hoy hasta las cámaras fotográficas más simples y baratas tienen óptica antirreflejante.

Para terminar subrayaremos que la extincion de la luz por la luz no significa que la energía luminosa se transforme en otras formas de energía. Lo mismo que en el caso de la interferencia de las ondas mecánicas, la extinción de las ondas entre sí en una parte dada del espacio significa simplemente que la energía luminosa no llega a ella La extinción de las ondas reflejadas significa, por consiguiente, que toda la luz pasa a través del objetivo.

¿ ?

1. ¿Cómo se obtienen las ondas luminosas coherentes?
2. ¿En qué consiste el fenómeno de interferencia de la luz?
3. ¿Con qué característica física de las ondas luminosas está relacionada la diferencia de color?
4. Si una capa de hielo transparente recibe un golpe seco de una piedra, se originan en él grietas que ofrecen todos los colores del espectro. ¿A qué se debe esto?

[1] En la práctica se deposita una capa cuyo espesor es mayor en un número entero de longitudes de onda. Esto es más cómodo. El procedimiento industrial para recubrir las superficies de los vidrios ópticos con finas películas se debe a los científicos soviéticos I. V. GREBENSCHIKOV, A. N. TERENIN y otros.

5 La longitud de una onda disminuye en el agua n veces (n es el índice de refracción del agua respecto del aire). ¿Significa esto que un buceador debajo del agua no puede ver los objetos que lo rodean a la luz natural?

6. Cite las principales aplicaciones de la interferencia

7.6. Difracción de la luz

Si la luz es un proceso ondulatorio, además de la interferencia, debe observarse la difracción de la luz, ya que ésta, es decir, el rodeo de los bordes de los obstáculos por las ondas, es característica de todo movimiento ondulatorio. Pero observar la difracción de la luz no es fácil. Esto se debe a que las ondas sólo rodean de un modo apreciable aquellos obstáculos cuyas dimensiones son comparables con la longitud de onda, y la longitud de una onda luminosa es muy pequeña.

Haciendo pasar un estrecho haz de luz por un orificio pequeño se puede observar que se infringe la ley de la propagación rectilínea de la luz. La mancha brillante que surge frente al orificio es mayor que la que debería aparecer si se cumpliera dicha ley.

EXPERIMENTO DE YOUNG. En 1802, Young, después de descubrir la interferencia de la luz, hizo su experimento clásico de difracción (fig. 193). En una pantalla opaca practicó con una aguja dos pequeños orificios B y C a poca

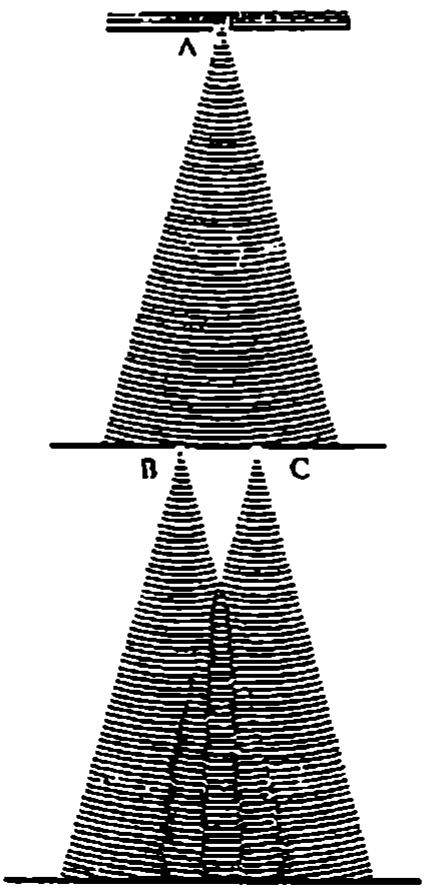


Fig. 193

Augustin Fresnel (1788-1827), eminente físico francés. Sentó las bases de la óptica ondulatoria. Completando el principio de Huygens con la idea de la interferencia de las ondas secundarias, construyó la teoría cuantitativa de la difracción. Fundándose en ella explicó las leyes de la óptica geométrica y, en particular, el carácter rectilíneo de la propagación de la luz en un medio homogéneo. Ideó un método aproximado para calcular la figura de difracción, basado en la división de la superficie de onda en zonas. Demostró por primera vez que las ondas luminosas son transversales. Las fórmulas de Fresnel para calcular las amplitudes y las fases de las ondas reflejada y refractada conservan su valor en nuestros días.

distancia uno de otro. Estos orificios los ilumino con un haz de luz estrecho que pasaba, a su vez, por un orificio pequeño *A* practicado en otra pantalla. Precisamente este detalle, difícil de prever en aquel tiempo, fue el que decidió el éxito del experimento, ya que sólo interfieren las ondas coherentes. La onda esférica que, de acuerdo con el pricipio de Huygens, se producía en el orificio *A* excitaba en los orificios *B* y *C* oscilaciones coherentes. En virtud de la difracción, de estos orificios salían dos conos luminosos que se superponían parcialmente. Como resultado de la interferencia de las ondas luminosas, sobre una tercera pantalla aparecían franjas brillantes y oscuras que se sucedían alternativamente. Tapando uno de los orificios, Young observó que las franjas de interferencia desaparecían. Valiéndose de este experimento precisamente indio Young por primera vez y con bastante exactitud las longitudes de onda, correspondientes a los rayos luminosos de distinto color.

TEORÍA DE FRESNEL. El estudio de la difracción culmino en los trabajos de A. J. Fresnel. Éste no sólo investigo con más detalle diversos casos de difracción, sino que construyo una teoría cuantitativa de la difracción que, en principio, da la posibilidad de calcular la figura de difracción que aparece cuando la luz bordea un objeto cualquiera. También él explicó por primera vez la propagación rectilínea de la luz en un medio homogéneo basándose en la teoría ondulatoria.

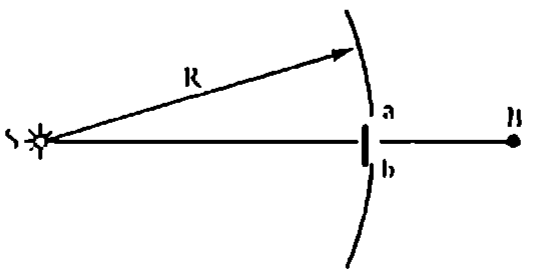


Fig. 194

Fresnel consiguió estos éxitos unificando el principio de Huygens con la idea de la interferencia de las ondas secundarias. De esto se habló sucintamente en el capítulo 4.

Para calcular la amplitud de una onda luminosa en un punto cualquiera del espacio hay que cercar mentalmente el foco de luz con una superficie cerrada. La interferencia de las ondas de los focos secundarios situados en esta superficie determina la amplitud en el punto que se considera del espacio.

Este tipo de cálculos dio la posibilidad de comprender cómo la luz de un foco puntual S, emisor de ondas esféricas, llega a un punto arbitrario B del espacio (fig. 194). Si se consideran los focos secundarios de la superficie de cada onda esférica de radio R, el resultado de las interferencias de las ondas secundarias de estos focos en el punto B es el mismo que si sólo los focos secundarios que se encuentran en un pequeño segmento esférico ab enviaran su luz al punto B. Las ondas secundarias, emitidas por los focos situados en el resto de la superficie, se extinguen entre sí a causa de la interferencia. Por eso todo ocurre como si la luz sólo se propagara a lo largo de la recta SB, es decir, rectilíneamente.

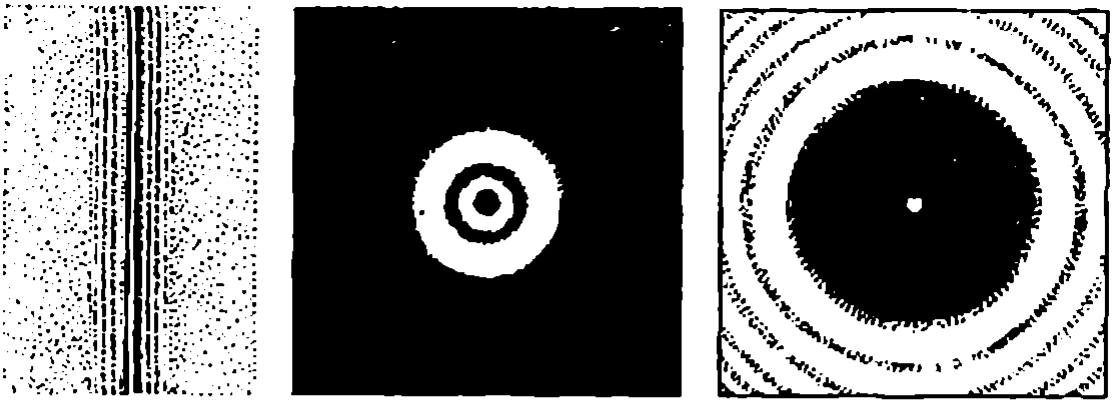
Al mismo tiempo Fresnel estudió la difracción cuantitativa en diversos tipos de obstáculos.

Un caso curioso ocurrió en una sesión de la Academia de Ciencias de París en el año 1818. Uno de los científicos presentes en la reunión (Poisson) advirtió que de la teoría de Fresnel se deducían hechos que contradicen claramente el buen sentido. Para determinadas dimensiones de un orificio y determinadas distancias desde éste al foco de luz y a la pantalla, en el centro de la mancha brillante debe haber una manchita oscura. Y, al contrario, detrás de un pequeño disco opaco debe haber un punto brillante en el centro de la sombra. Cuál no sería la sorpresa de los científicos, cuando los experimentos que se hicieron (por D. F. Arago) demostraron que, efectivamente, así ocurría en realidad.

FIGURAS DE DIFRACCIÓN CORRESPONDIENTES A DISTINTOS OBSTÁCULOS. Como la longitud de la onda luminosa es muy pequeña, el ángulo de desviación de la luz de su dirección rectilínea de propagación es pequeño. Por eso para poder observar claramente la difracción (y en particular, en todos los casos recién mencionados) la distancia entre el obstáculo que ha de rodear la luz y la pantalla debe ser grande. Si esta distancia es muy grande (del orden de varios kilómetros), la difracción se puede observar detrás de objetos bastante grandes (del tamaño de varios metros).

En la fig. 195 se muestran los aspectos que tienen las fotografías de las figuras de difracción producidas por distintos obstáculos: a) por un alambre delgado, b) por un orificio redondo, y c) por una pantalla redonda.

LÍMITES DE APLICABILIDAD DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA. Todas las teorías físicas expresan, aproximadamente, los procesos que realmente tienen lugar en la naturaleza. Para cualquier teoría pueden indicarse determinados límites de aplicabilidad. El que en un caso concreto se puede aplicar o no una teoría determinada depende no sólo de la exactitud que asegura esta teoría, sino también de la exactitud que requiere la solución de cada problema práctico. Los límites de una teoría sólo se pueden establecer una vez construida una teoría más general que abarque los mismos fenómenos.



a b c

Fig. 195

Todas estas conclusiones de carácter general se refieren también a la óptica geométrica. Esta teoría es aproximada. No es capaz de explicar los fenómenos de la interferencia y de la difracción de la luz. Una teoría más general y exacta es la óptica ondulatoria. La ley de la propagación rectilínea de la luz y otras leyes de la óptica geométrica se cumplen con suficiente precisión sólo cuando las dimensiones de los obstáculos, que encuentra la luz en su camino de propagación, son mucho mayores que la longitud de la onda luminosa.

El funcionamiento de los instrumentos ópticos a que se hizo referencia en el capítulo 6 se pueden explicar basándose en las leyes de la óptica geométrica. De acuerdo con esta teoría se pueden distinguir con el microscopio detalles de un objeto tan pequeños como se quiera; con el telescopio se puede establecer la existencia de dos estrellas por muy pequeñas que sean las distancias angulares entre ellas. Sin embargo, en realidad no ocurre así, y únicamente la teoría ondulatoria permite esclarecer las causas por las cuales existe un límite del poder separador o resolutivo de los instrumentos ópticos.

PODER SEPARADOR DEL MICROSCOPIO Y DEL TELESCOPIO

La naturaleza ondulatoria de la luz impone un límite a la posibilidad de distinguir detalles de un objeto u objetos muy pequeños observados al microscopio. La difracción no permite obtener imágenes nítidas de objetos pequeños, porque la luz no se propaga rigurosamente en línea recta, sino que rodea los objetos. Por eso la imagen resulta borrosa. Ningún aumento da la posibilidad de distinguir detalles cuyas imágenes borrosas se confunden. Esto ocurre cuando las dimensiones de los objetos son menores que la longitud de la onda luminosa.

La difracción también impone un límite al poder resolutivo del telescopio. A causa de la difracción de las ondas, cerca de los bordes de la montura del objetivo la imagen de una estrella no será un punto, sino un sistema de anillos brillantes y oscuros. Es cierto que los radios de estos anillos son muy pequeños, porque el diámetro del objetivo es mucho mayor que la longitud de onda. Pero si dos estrellas se encuentran entre sí a una distancia angular pequeña, los antedichos anillos se superponen y el ojo es incapaz de distinguir si los puntos luminosos son dos o uno solo. La distancia angular límite entre dos puntos luminosos, a la cual estos se pueden distinguir, se determina por la razón de la longitud de onda al diámetro del objetivo.

7.7. Red de difracción

En el fenómeno de la difracción se basa la estructura de un magnífico instrumento óptico, la *red de difracción*. Una red de difracción es el conjunto de un gran número de rendijas o estrías separadas por espacios intermedios opacos (fig. 196). Las buenas redes de difracción se hacen en una máquina divisora especial que raya trazos paralelos sobre una lámina de vidrio. El número de trazos llega hasta varios millares en 1 cm y el total de ellos supera 100 000. Son fáciles de hacer réplicas de gelatina de esta red y sujetarlas entre dos láminas de vidrio. Las que mejores cualidades tienen son las llamadas *redes de reflexión*. Éstas consisten en una sucesión alternativa de elementos que reflejan la luz y de elementos que la dispersan. Los trazos que dispersan la luz se rayan con una cuchilla especial bien afilada sobre una lámina metálica pulimentada.

Si la anchura de las rendijas transparentes (o de las franjitas reflectoras) es a y la anchura de los intervalos opacos (o franjitas dispersoras de la luz) es b, la magnitud $d = a + b$ se llama *período de la red*. Pasemos ahora a estudiar la teoría elemental de la red de difracción.

Supongamos que sobre la red incide una onda monocromática plana de longitud λ (fig. 197). Los focos secundarios que se encuentran en las rendijas crean ondas luminosas que se propagan en todas las direcciones. Hallemos la condición con la cual las ondas que parten de las rendijas se refuerzan entre sí. Para eso consideremos las ondas que se propagan en la dirección dada por el ángulo φ. La diferencia de marcha entre las ondas procedentes de los bordes de rendijas contiguas es igual a la longitud del segmento AC. Si en este segmento cabe un número entero de longitudes de onda, las ondas de todas las rendijas, componiéndose, se refuerzan unas a otras. Por el triángulo ABC se puede hallar la longitud del cateto AC:

$$|AC| = |AB| \operatorname{sen} \varphi = d \operatorname{sen} \varphi.$$

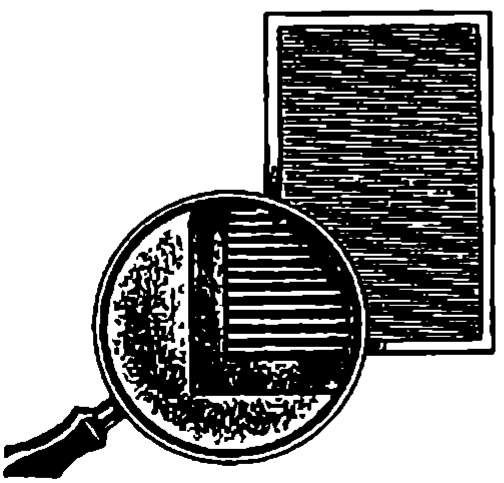


Fig. 196

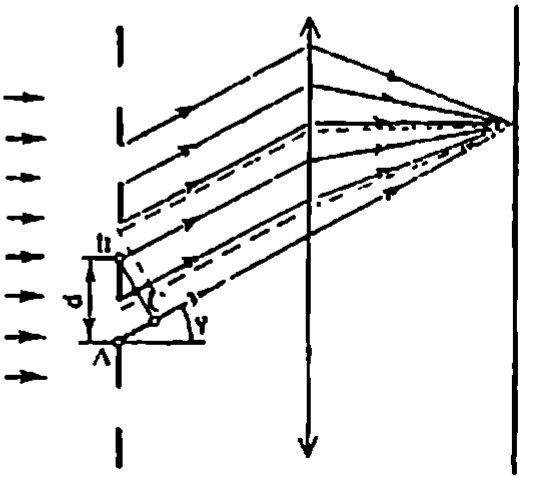


Fig. 197

Los máximos se observan bajo el ángulo φ determinado por la condición

$$d \operatorname{sen} \varphi = k\lambda, \tag{7.7}$$

donde $k = 0, 1, 2, \ldots$. Éstos son los *máximos principales*.

Debe tenerse en cuenta que cuando se cumple la condición (7.7) se refuerzan no sólo las ondas que parten de los bordes inferiores (según la figura) de las rendijas, sino también las ondas que parten de todos los demás puntos de las rendijas. A cada punto de la primera rendija corresponde un punto de la segunda situado a la distancia d. Por eso la diferencia de marcha de las ondas secundarias emitidas por estos puntos es igual a $k\lambda$ y éstas se refuerzan entre sí.

Detrás de la red se coloca una lente convergente en cuyo plano focal se sitúa una pantalla. La lente enfoca los rayos paralelos en un punto. En este punto se produce la composición de las ondas y su reforzamiento mutuo. Los ángulos φ que satisfacen la condición (7.7) determinan la posición de los máximos en la pantalla.

Como la posición de los máximos (excepto el central, correspondiente a $k = 0$) depende de la longitud de onda, la red descompone la luz blanca en un espectro (fig. IV, 1 de las láminas en color). Cuanto mayor sea λ, tanto más lejos del máximo central se encontrarán los máximos correspondientes a la longitud de onda dada (figs. IV, 2 y 3 de las láminas en color). A cada valor de k le corresponde su espectro.

Con la red de difracción se pueden medir muy exactamente las longitudes de onda. Si el período de la red se conoce, la determinación de la longitud de onda se reduce a medir el ángulo φ de la correspondiente dirección al máximo.

Las pestañas de los párpados, con los intervalos que hay entre ellas, son una especie de red de difracción burda. Por eso, si entornando los ojos, se mira un foco de luz brillante, se pueden ver colores irisados. La luz blanca se descompone en el espectro al refringirse alrededor de las pestañas. Una placa de gramófono de surco fino se asemeja a una red de difracción por reflexión. Si esta placa se mira a la luz reflejada por ella de una lámpara eléctrica, se ve la descomposición de la luz en el espectro. Se pueden observar varios espectros, correspondientes a distintos valores de k. La figura de difracción será muy nítida si la luz de la lámpara incide sobre la placa formando un ángulo grande.

7.8 Carácter transversal de las ondas luminosas. Polarización de la luz

Los fenómenos de la interferencia y de la difracción demuestran indudablemente que la luz que se propaga tiene las propiedades de las ondas. Pero, ¿de qué ondas, de las longitudinales o de las transversales?

Durante mucho tiempo los fundadores de la óptica ondulatoria, Young y Fresnel, pensaron que las ondas luminosas eran longitudinales, es decir, semejantes a las ondas sonoras. En aquel tiempo las ondas luminosas eran consideradas como ondas elásticas en el éter, que llenaba todo el espacio y penetraba en todos los cuerpos. Las ondas transversales sólo pueden existir en los sólidos (véase el capítulo 4). Si el éter fuera sólido, ¿cómo iban a moverse los cuerpos en él sin encontrar resistencia? Porque el éter no podía impedir el movimiento de los cuerpos. De lo contrario no se cumpliría la ley de la inercia.

Fig. 199

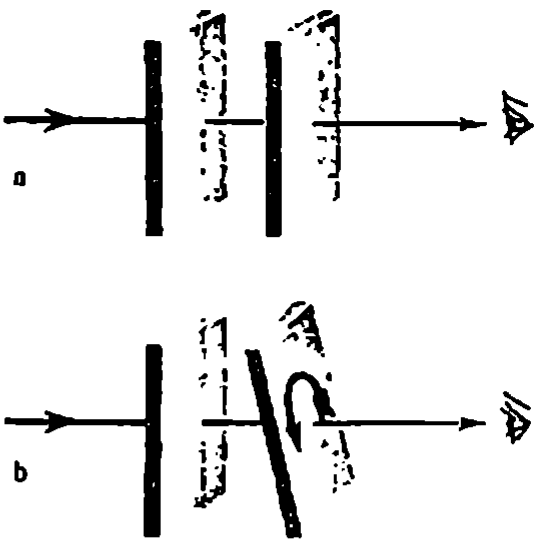
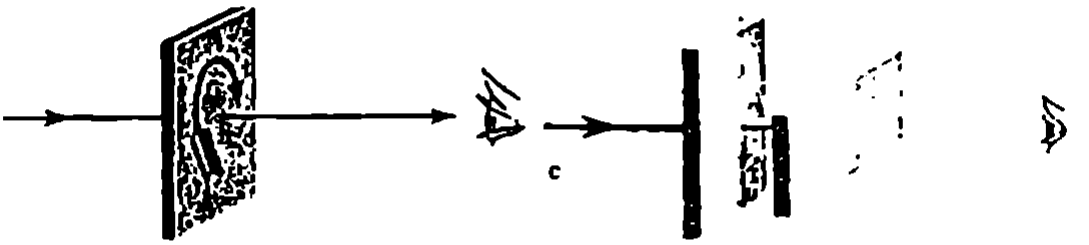


Fig. 198



No obstante, cada vez se iban acumulando más hechos imposibles de comprender considerando las ondas luminosas como longitudinales. Bajo la presión de estos hechos Fresnel se vio obligado, por fin, a reconocer que las ondas luminosas son transversales, a pesar de que parecía extraordinariamente raro, desde el punto de vista de la teoría del éter mecánico como portador de las ondas luminosas.

EXPERIMENTOS CON TURMALINA El carácter transversal de las ondas luminosas ha sido demostrado con muchos experimentos. Vamos a examinar detalladamente sólo uno de ellos, muy sencillo y llamativo. Este experimento se hace con cristales de turmalina (transparentes, de color verde).

El cristal de turmalina tiene eje de simetría y pertenece a los llamados cristales uniáxicos Tomemos una lámina rectangular de turmalina cortada de tal modo que uno de sus lados coincida con el eje del cristal. Si sobre esta lámina se hace incidir normalmente un haz de luz de una lámpara eléctrica o del Sol, la rotación de la lámina en torno del haz no produce variación alguna en la intensidad de la luz que pasa a través de ella (fig. 198) Puede pensarse que la luz sólo es absorbida parcialmente por la turmalina y adquiere color verdoso. Y nada más Pero esto no es así La onda luminosa adquiere nuevas propiedades

Estas nuevas propiedades se ponen de manifiesto si el haz se hace pasar a través de un segundo cristal de turmalina, exactamente igual que el primero (fig. 199, *a*), y paralelo a él. Cuando los ejes de los cristales están dirigidos en el mismo sentido, tampoco ocurre nada interesante, simplemente el haz luminoso se debilita más a causa de la absorción por el segundo cristal Pero si este segun-

do cristal se gira, permaneciendo el primero en reposo (fig 199, *b*), se observa un fenómeno interesante, la luz se extingue A medida que aumenta el ángulo entre los ejes, la intensidad de la luz va disminuyendo y cuando los ejes son perpendiculares entre sí la luz no pasa en absoluto (fig 199, *c*) Es absorbida totalmente por el segundo cristal ¿Cómo se explica esto?

CARACTER TRANSVERSAL DE LAS ONDAS LUMINOSAS. De los experimentos antes descritos se deducen dos hechos. PRIMERO, que la onda luminosa que parte del foco es totalmente simétrica respecto de la dirección en que se propaga (al girar el cristal alrededor del rayo en el primer experimento, la intensidad de la luz no varió), y SEGUNDO, que la onda que emerge del primer cristal no posee simetría axil (porque en dependencia del giro del segundo cristal alrededor del rayo se obtiene distinta intensidad de la luz transmitida)

Las ondas longitudinales tienen simetría absoluta respecto de la dirección en que se propagan (las oscilaciones se producen a lo largo de esta dirección, que es a la vez el eje de simetría de la onda). Por eso si la onda luminosa fuera longitudinal sería imposible explicar el experimento en que se hace girar la segunda lámina

Este experimento se puede explicar perfectamente haciendo dos suposiciones.

La PRIMERA SUPOSICION se refiere a la propia luz. La luz es una onda transversal. Pero en el haz de ondas incidente, que procede de un foco ordinario, existen oscilaciones en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación de la onda (fig. 200)

De acuerdo con esta suposición, la onda luminosa tiene simetría axil y, al mismo tiempo, es transversal. Las ondas de la superficie del agua, por ejemplo, no poseen esta simetría, ya que las oscilaciones de las partículas del agua sólo se cumplen en el plano vertical.

Una onda luminosa con oscilaciones en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación se dice que es *natural* Este nombre es apropiado, porque en las condiciones normales las fuentes de luz crean precisamente ondas de este tipo. La suposición hecha explica el resultado del primer experimento Con la rotación del cristal de turmalina no varía la intensidad de la luz transmitida porque la onda incidente tiene simetría axil (a pesar de ser transversal).

La SEGUNDA SUPOSICION que es necesario hacer se refiere al cristal El cristal de turmalina tiene la propiedad de transmitir únicamente las ondas luminosas cuyas oscilaciones se efectúan en un plano determinado (el plano *P* en la fig 201). Esta luz recibe el nombre de *polarizada* o, más exactamente, de

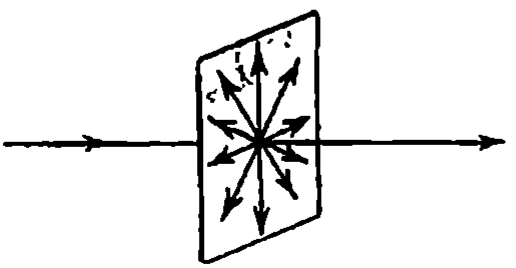


Fig. 200

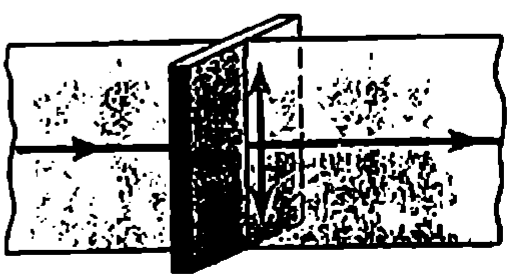


Fig. 201

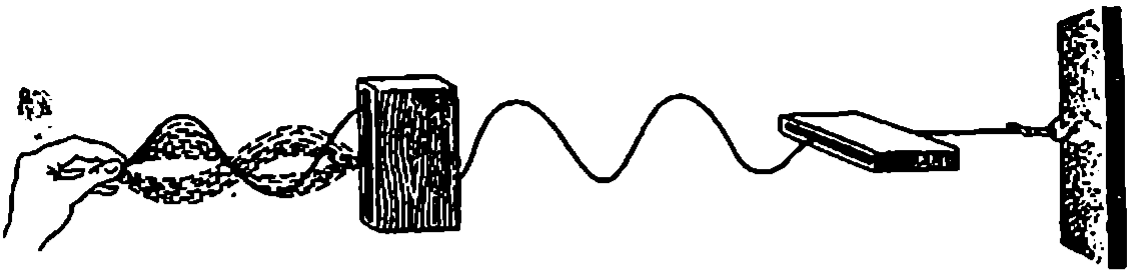


Fig. 202

planopolarizada o *polarizada rectilíneamente*, para distinguirla de la luz natural, que también puede llamarse *no polarizada*. Esta suposición explica totalmente los resultados del segundo experimento. Del primer cristal emerge una onda planopolarizada Cuando los cristales se cruzan (el ángulo entre sus ejes es de 90°) esta onda no pasa a través del segundo cristal. Si los ejes forman entre sí un ángulo distinto de 90°, pasan oscilaciones cuya amplitud es igual a la proyección de la amplitud de la onda transmitida por el primer cristal sobre la dirección del eje del segundo cristal

Así, pues, el cristal de turmalina polariza la luz, es decir, transforma la luz natural en luz polarizada.

MODELO MECÁNICO DE LOS EXPERIMENTOS CON LA TURMALINA. No es difícil construir un modelo mecánico simple e intuitivo del fenómeno recién estudiado. En un cordón de goma se puede crear una onda transversal de tal manera que las oscilaciones cambien rapidamente de dirección en el espacio. Esta onda será la análoga de la onda luminosa natural Hagamos pasar ahora el cordón a través de una cajita estrecha formada por dos tablillas (fig. 202). De las oscilaciones en todas las direcciones posibles la cajita "separa" las oscilaciones en un plano determinado, por lo que de ella sale una onda polarizada.

Si en el camino de esta onda hay otra cajita igual, pero que forme con la primera un ángulo de 90°, las oscilaciones no pasarán a través de ella. La onda se extinguirá totalmente.

POLAROIDES. No sólo los cristales de turmalina son capaces de polarizar la luz. Esta misma propiedad la tienen, por ejemplo, los llamados *polaroides* Un polaroide es una película delgada (de 0,1 mm) de cristales de herapatita (yodosulfuro de quinina) depositados sobre una lámina de celuloide o de vidrio Con los polaroides se pueden hacer los mismos experimentos que con los cristales de turmalina Pero los polaroides tienen la ventaja de que con ellos se pueden hacer grandes superficies polarizadoras de la luz. Entre los inconvenientes de los polaroides figura el matiz violáceo que dan a la luz blanca.

Ya hace tiempo que se viene estudiando el problema de poner polaroides en los faros y en los parabrisas de los automóviles para evitar el deslumbramiento que produce la luz de los coches que vienen al encuentro. Para esto el polaroide de los faros y del parabrisas debe dejar pasar las oscilaciones bajo un ángulo de 45° con el horizonte En este caso la dirección de las oscilaciones luminosas procedentes de los coches que marchan en sentido contrario será perpendicular al plano en el cual el polaroide deja pasar las oscilacinnes La luz de los faros se

extinguirá. En cambio, la luz propia polarizada de un automóvil dado, después de reflejarse sobre la carretera, pasará a través del parabrisas.

El empleo del polaroide tendrá sentido si todos los automóviles se proveen de él.

7.9. El carácter transversal de las ondas luminosas y la teoría electromagnética de la luz

La teoría electromagnética de la luz tiene su origen en los trabajos de Maxwell. Éste demostró por vía puramente teórica (véase el § 5.4) la posibilidad de la existencia de las ondas electromagnéticas y halló que la velocidad de propagación de estas ondas en el vacío debía ser igual a la velocidad de la luz, que en aquel tiempo ya era conocida. Sobre esta base supuso Maxwell que la luz era una onda electromagnética.

Además, de la teoría de Maxwell se infiere directamente que las ondas electromagnéticas son transversales. El carácter transversal de las ondas luminosas ya había sido demostrado con experimentos. Por eso Maxwell consideró fundadamente que el hecho de que las ondas electromagnéticas fueran transversales era una importante demostración más en pro de la validez de la teoría electromagnética de la luz.

Cuando Hertz obtuvo experimentalmente las ondas electromagnéticas y midió su velocidad, la teoría electromagnética de la luz recibió su primera confirmación. Quedó demostrado que las ondas electromagnéticas al propagarse ponen de manifiesto las mismas propiedades que las luminosas, a saber: se reflejan, refractan, interfieren, difractan, polarizan, etc., (véase el § 5.9). A finales del siglo XIX quedó establecido definitivamente que las ondas luminosas son excitadas por las partículas cargadas que se mueven dentro de los átomos.

Al ser reconocida la teoría electromagnética de la luz fueron desapareciendo poco a poco las dificultades debidas a la necesidad de introducir el medio hipotético, el éter, que había que considerar como sólido. Las ondas luminosas no son ondas mecánicas que se propagan en un medio especial omnipresente, el éter, sino ondas electromagnéticas. Los procesos electromagnéticos no se subordinan a las leyes de la mecánica, sino a sus propias leyes. Estas leyes fueron establecidas en su forma definitiva por Maxwell.

En la onda electromagnética los vectores $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí (véase el cap. V). En la luz natural las oscilaciones de la intensidad del campo eléctrico $\vec{E}$ y de la inducción magnética $\vec{B}$ se producen en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación de la onda. Si la luz está polarizada, las oscilaciones tanto de $\vec{E}$ como de $\vec{B}$ se efectúan no en todas las direcciones, sino en dos planos determinados. La onda electromagnética representada en la fig. 95 está polarizada.

Se plantea naturalmente la pregunta: al hablar de la dirección de las oscilaciones en la onda luminosa, ¿a las oscilaciones de qué vector nos referimos, a las del $\vec{E}$ o a las del $\vec{B}$? Experimentos hechos especialmente han demostrado que sobre la retina del ojo o sobre la emulsión fotográfica actúa precisamente el campo eléctrico de la onda luminosa.

A esto se debe que como dirección de las oscilaciones en la onda luminosa se tome la dirección del vector intensidad $\vec{E}$ del campo eléctrico.

¿ ?

1. ¿Por qué es imposible ver un átomo al microscopio?
2. Enuncie el principio de Huygens–Fresnel
3. ¿Depende la posición de los máximos principales en una red de difracción del numero de rendijas en ésta?
4. ¿En qué difiere la luz natural de la polarizada?
5. ¿En qué casos son válidas, con aproximación, las leyes de la óptica geométrica?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. En el experimento de Young, para demostrar la difracción, la distancia entre las rendijas era $d = 0{,}07$ mm y la distancia desde la rendija doble hasta la pantalla, $D = 2$ m. Cuando el dispositivo se iluminaba con luz verde, la distancia entre las franjas de difracción brillantes contiguas resultó ser $\Delta h = 16$ mm. Determinar por estos datos la longitud de onda.

Solución. En cierto punto C de la pantalla (fig. 203) se observará un máximo de iluminación si se cumple la condición

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

donde $k = 0, 1, 2, \ldots$ son números enteros.

Se aplica el teorema de Pitágoras a los triángulos S_1CE y S_2CB.

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Restando término a término la segunda igualdad de la primera, se obtiene

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d, \quad \text{o} \quad (d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d$$

Y como $d \ll D$, será $d_1 + d_2 \approx 2D$. Por consiguiente,

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}$$

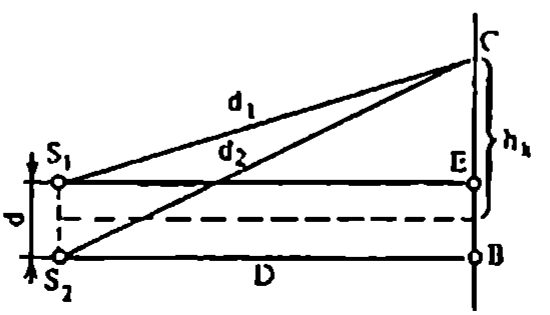


Fig. 203

Teniendo en cuenta que $d_2 - d_1 = k\lambda$, se puede escribir.

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}.$$

De donde se halla la distancia desde la k-ésima franja luminosa hasta el centro de la pantalla:

$$h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

La distancia entre las franjas contiguas será:

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

De donde

$$\lambda \approx \frac{d}{D}\frac{\Delta h}{} \approx 5{,}6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

PROBLEMA 2 Sobre una red de difracción que tiene 500 rayas por milímetro, incide una onda monocromática plana ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ cm) Determinar el orden k máximo del espectro que se puede observar cuando los rayos inciden perpendicularmente sobre la red.

Solución A k máximo corresponde sen $\varphi = 1$ (véase la fórmula 7.7). Por lo tanto, $k = d/\lambda = 4$.

Ejercicio 10

1 En la fig. 204 se representa el esquema del experimento de Michelson para determinar la velocidad de la luz. ¿Qué número de revoluciones por segundo debe realizar el prisma octogonal de espejos para que el foco se vea en el anteojo, si el rayo luminoso recorre una distancia aproximadamente igual a 71 km?

2 El índice de refracción del agua para la luz roja de longitud de onda en

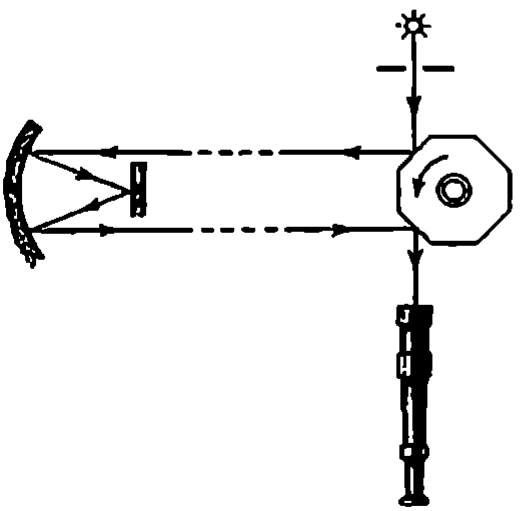


Fig. 204

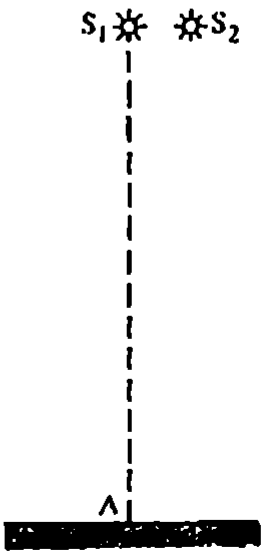


Fig. 205

el vacío $\lambda_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ cm es $n_1 = 1{,}331$, y para la luz violeta de longitud de onda en el vacío $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-5}$ cm es $n_2 = 1{,}343$. Hallar las longitudes de estas ondas en el agua y su velocidad de propagación.

3. Dos focos coherentes S_1 y S_2 emiten luz de longitud de onda $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ cm. Los focos se encuentran entre sí a la distancia $d = 0{,}3$ cm. La pantalla está a 9 m de distancia de los focos. ¿Qué se observará en el punto A de la pantalla (fig. 205): una mancha brillante o una mancha oscura?
4. Sobre una red de difracción, cuyo período $d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ cm, incide normalmente una onda monocromática. Calcular la longitud λ de la onda si el ángulo entre los espectros de segundo y tercer orden es $\Delta\varphi = 2°30'$.

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 7

La velocidad de la luz en el vacío ha sido medida experimentalmente. Esta velocidad es igual, aproximadamente, a 300 000 km/s. En todos los medios la velocidad de la luz es menor que en el vacío.

La refracción de la luz en el límite de separación de dos medios se debe a que la velocidad de la luz varía al pasar ésta de un medio a otro. El índice de refracción relativo de dos medios es igual a la razón de la velocidad de la luz en dichos medios.

El índice de refracción de la luz, como estableció por primera vez Newton, depende de su color. El color de la luz depende a su vez de la frecuencia de las oscilaciones (o de la longitud de la onda luminosa). La dependencia del índice de refracción de la luz respecto de las oscilaciones se llama dispersión. La dispersión hace que el prisma descomponga la luz blanca en un espectro.

La velocidad de la luz en un medio disminuye a causa de que la longitud de la onda luminosa en dicho medio también disminuye. La frecuencia de las oscilaciones permanece invariable.

Cuando ondas coherentes se superponen entre sí, se observa la interferencia de la luz. Las ondas se refuerzan o atenúan una a otra en dependencia de la diferencia de la marcha entre ellas. Se forman ondas coherentes cuando las ondas luminosas se reflejan en las dos superficies de una película delgada. Como la diferencia de fase de las oscilaciones de las ondas que interfieren no solo depende del grosor de la película, sino también de la longitud de onda, cuando la película se ilumina con luz blanca se origina una figura de interferencia coloreada (colores de las pompas de jabón, de los anillos de Newton, etc.).

Las ondas luminosas rodean los obstáculos cuyas dimensiones son comparables con la longitud de onda. En esto consiste el fenómeno de la difracción de la luz. Como la longitud de una onda luminosa es muy pequeña (del orden de 10^{-5} cm), la difracción de la luz es difícil de observar y para hacerlo se requieren dispositivos especiales. La difracción de la luz impone un límite al poder separador del microscopio y del telescopio.

Las leyes de la óptica geométrica se cumplen aproximadamente con la

condición de que las dimensiones de los obstáculos, que encuentran a su paso las ondas luminosas, sean mucho mayores que la longitud de onda

En el fenómeno de la difracción se basa la estructura de la red de difracción. Ésta es el conjunto de un gran número de rendijas separadas entre sí por estrechos intervalos Los valores de los ángulos φ que determinan las direcciones a los máximos de difracción principales del espectro que se obtiene con la red, se hallan partiendo de la igualdad

$$d \operatorname{sen} \varphi = k\lambda,$$

en la que $k = 0, 1, 2, \ldots$, y d es el periodo de la red

La red descompone la luz blanca en el espectro, con ella se pueden medir las longitudes de las ondas luminosas

La ondas luminosas son transversales Esto se ha demostrado experimentalmente observando el paso de la luz a través de medios anisótropos (cristales). Una onda luminosa en la cual las oscilaciones tienen lugar en un plano deter minado, se dice que está polarizada. La luz que proporcionan los focos ordinarios (luz natural) no está polarizada En una onda luminosa no polarizada las oscilaciones se producen en todas las direcciones en un plano perpendicular a la dirección en que se propaga la onda.

Según la teoria electromagnética de la luz, propuesta por Maxwell, la luz es una onda electromagnética transversal. La demostración del carácter transversal de las ondas luminosas constituyó una etapa importante en el reconocimiento de la exactitud de la teoría electromagnética de la luz.

8 ELEMENTOS DE TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

8.1. Leyes de la electrodinámica y principio de la relatividad

ESENCIA DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD. El desarrollo de la electrodinámica condujo a la revisión de los conceptos de espacio y tiempo.

Según las ideas clásicas acerca del espacio y del tiempo, consideradas inmutables durante siglos, el movimiento no ejerce influencia alguna en el transcurso del tiempo (el tiempo es absoluto) y las dimensiones lineales de un cuerpo cualquiera no dependen de si dicho cuerpo está en reposo o en movimiento (la longitud también es absoluta).

La teoría especial de la relatividad de Einstein es una nueva concepción del espacio y del tiempo que ha venido a sustituir las nociones antiguas (clásicas)

EL PRINCIPIO DE LA RELATIVIDAD EN MECÁNICA Y ELECTRODINÁMICA. Después de enunciar Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX las leyes fundamentales de la electrodinámica, se planteó la cuestión de si el principio de la relatividad, correcto para los fenómenos mecánicos, se extiende a los fenómenos electromagnéticos En otras palabras, ¿transcurren de igual modo los procesos electromagnéticos (la interacción de las cargas y la corriente, la propagación de las ondas electromagnéticas, etc.) en todos los sistemas inerciales de referencia? O, ¿puede ser que el movimiento rectilíneo uniforme, sin influir en los fenómenos mecánicos, ejerza cierta acción sobre los procesos electromagnéticos?

Para poder responder a esta pregunta había que esclarecer si las leyes fundamentales de la electrodinámica varían al pasar de un sistema inercial a otro, o si, por el contrario, permanecen invariables lo mismo que las leyes de Newton Sólo en el último caso se pueden desechar las dudas sobre la validez del principio de la relatividad referido a los procesos electromagnéticos y considerar este principio como una ley general de la naturaleza

Las leyes de la electrodinámica son muy complejas y la solución rigurosa de este problema no es cosa fácil. Sin embargo, al parecer, incluso razonamientos simples permiten hallar una respuesta acertada Según las leyes de la electrodinámica la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es la misma en todas las direcciones e igual a $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s Pero, por otra parte, de acuerdo con la ley de composición de las velocidades de la mecánica de Newton, la velocidad sólo puede ser igual a c en un sistema de referencia privilegiado. En cualquier otro sistema de referencia, que se mueva respecto de este sistema privilegiado con una velocidad v, la velocidad de la luz debe ser igual a $c - v$. Esto significa que, si es justa la ley ordinaria de composición de las velocidades, al pasar de un sistema inercial a otro las leyes

de la electrodinámica deben cambiar de manera que en el nuevo sistema la velocidad de la luz no sea ya igual a c, sino a $c - v$.

Así, pues, se descubrieron ciertas contradicciones entre la electrodinámica y la mecánica de Newton, cuyas leyes están de acuerdo con el principio de la relatividad. Las dificultades surgidas se podía intentar resolverlas por tres procedimientos distintos.

La PRIMERA posibilidad consistía en proclamar injustificada la aplicación del principio de la relatividad a los fenómenos electromagnéticos. Este punto de vista fue mantenido por el gran físico holandés, fundador de la teoría electrónica, Hendrik LORENTZ. Los fenómenos electromagnéticos, ya en los tiempos de Faraday, se consideraban como procesos que tenían lugar en un medio especial omnipresente, que ocupaba todo el espacio, el "éter universal". Un sistema inercial de referencia, en reposo respecto del éter, constituye, según Lorentz, un sistema especial privilegiado. En él las leyes de la electrodinámica de Maxwell serían justas y tendrían la forma más simple. Sólo en este sistema de referencia la velocidad de la luz en el vacío es igual en todas las direcciones.

La SEGUNDA posibilidad consistía en considerar inexactas las ecuaciones de Maxwell e intentar cambiarlas de tal modo que NO VARIARAN al pasar de un sistema inercial a otro (de acuerdo con las concepciones clásicas del espacio y del tiempo). Este intento fue hecho, en particular, por H. Hertz. Según él, el éter es arrastrado totalmente por los cuerpos en movimiento y por eso los fenómenos electromagnéticos transcurren del mismo modo, independientemente de que el cuerpo esté en reposo o en movimiento. Así el principio de la relatividad era correcto.

Finalmente, la TERCERA posibilidad de resolver las dificultades antedichas consistía en renunciar las nociones clásicas de espacio y tiempo, para conservar tanto el principio de la relatividad como las leyes de Maxwell. Esta era la vía más revolucionaria, puesto que significaba la revisión de las ideas más profundas y fundamentales de la física. Desde este punto de vista resultan inexactas no las ecuaciones del campo electromagnético, sino las leyes de la mecánica de Newton, que estaban de acuerdo con las antiguas concepciones del espacio y del tiempo. Había, pues, que cambiar las leyes de la mecánica y no las leyes de la electrodinámica de Maxwell.

La única posibilidad correcta resultó ser precisamente la tercera. Desarrollándola consecuentemente llegó Einstein a unos nuevos conceptos de espacio y tiempo. Las dos primeras vías fueron refutadas por los experimentos hechos.

Los intentos, realizados por Hertz, de cambiar las leyes de la electrodinámica de Maxwell pusieron de manifiesto que las nuevas ecuaciones eran incapaces de explicar una serie de hechos que se observan. Así, según la teoría de Hertz, el agua en movimiento debería arrastrar por completo la luz que en ella se propaga, puesto que arrastra al éter en que se propaga la luz. Pero las experiencias han demostrado que esto no ocurre en realidad.

EXPERIMENTO DE MICHELSON. El punto de vista de Lorentz, según el cual debe existir un sistema de referencia privilegiado, asociado con el éter universal, que se encuentre en reposo absoluto, también ha sido desmentido por experimentos directos.

Si la velocidad de la luz fuera igual a 300 000 km/s sólo en el sistema de referencia asociado al éter, midiendo la velocidad de la luz en un sistema inercial arbitrario, se podría descubrir el movimiento de dicho sistema respecto del éter y determinar la velocidad de este movimiento. De un modo semejante a como en un sistema de referencia que se mueve respecto del aire se produce viento, al moverse respecto del éter (claro está si éste existe) debe manifestarse el "viento de éter". Un experimento para descubrir el "viento de éter" fue realizado en 1881 por los científicos norteamericanos Albert MICHELSON y E. MORLEY siguiendo la idea expuesta por Maxwell 12 años antes.

En este experimento se comparó la velocidad de la luz en la dirección en que se mueve la Tierra con la velocidad en dirección perpendicular a dicho movimiento. Las medidas se hicieron con mucha exactitud por medio de un aparato especial, el interferómetro de Michelson. Los experimentos se hicieron a distintas horas del día y en diferentes estaciones del año. Pero en todas ellas el resultado fue negativo: no se consiguió descubrir el movimiento de la Tierra con respecto al éter.

Ocurría como si yendo en un automóvil a 100 km/h se sacara la cabeza por la ventanilla y no se notara viento alguno.

Por lo tanto, la idea de la existencia de un sistema de referencia privilegiado no resistió la prueba experimental. Esto indica, a su vez, que no existe medio especial alguno (como el "éter portador de la luz") al cual se pueda asociar dicho sistema de referencia.

8.2. Postulados[1] de la teoría de la relatividad

Para explicar los resultados negativos del experimento de Michelson y de otras experiencias que debían haber descubierto el movimiento de la Tierra respecto del éter, se introdujeron diversas hipótesis. Con ellas se intentó explicar por qué no se consigue descubrir el sistema de referencia privilegiado (suponiendo que tal sistema existiera en realidad). Así, en particular, para explicar el experimento de Michelson se propuso la hipótesis sobre el acortamiento de las dimensiones lineales de todos los cuerpos cuando éstos se mueven respecto del éter.

Einstein abordó el problema de un modo totalmente distinto: no hay que inventar diferentes hipótesis para explicar los resultados negativos de todos los intentos de descubrir la diferencia entre sistemas inerciales. La total equivalencia de los sistemas inerciales de referencia con respecto no sólo de los procesos mecánicos, sino también de los electromagnéticos, es una ley de la naturaleza. No existe diferencia alguna entre el estado de reposo y el de movimiento rectilíneo uniforme.

El *principio de la relatividad* es el postulado principal de la teoría de Einstein. Este postulado se puede enunciar así: todos los procesos que tienen

---

[1] El *postulado* en una teoría física desempeña el mismo papel que el *axioma* en matemáticas. Es una proposición fundamental que lógicamente no puede demostrarse. En física el postulado resulta de generalizar hechos experimentales.

Albert Einstein (1879–1955), el gran físico del siglo XX. Creador de la nueva teoría del espacio y el tiempo conocida como teoría especial de la relatividad. Extendiendo esta teoría al caso de los sistemas no inerciales de referencia, construyó la teoría general de la relatividad, que es la teoría moderna de la gravitación.
Introdujo el concepto de partícula de luz o fotón. Su trabajo sobre la teoría del movimiento browniano condujo al triunfo definitivo de la teoría cinéticomolecular de la estructura de la sustancia.
La humanidad conserva un profundo respeto por la actividad social progresista de Albert Einstein, que repetidas veces intervino en pro de la paz.

lugar en la naturaleza se realizan de la misma manera en todos los sistemas inerciales de referencia.

Esto quiere decir que, en todos los sistemas inerciales las leyes físicas tienen la misma forma. De este modo el principio de la relatividad de la mecánica clásica se extiende a todos los procesos de la naturaleza, incluidos los electromagnéticos.

Pero la teoría de la relatividad no solo se basa en el principio de la relatividad. Hay un segundo postulado: la velocidad de la luz en el vacío es igual en todos los sistemas inerciales de referencia. Esta velocidad no depende de la velocidad del foco ni de la velocidad del receptor de la señal luminosa.

La velocidad de la luz ocupa, por lo tanto, una posición especial. Es más, como se deduce de los postulados de la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz en el vacío es la velocidad máxima posible de transmisión de las interacciones en la naturaleza.

Para decidirse a enunciar los postulados de la teoría de la relatividad hacía falta una gran audacia científica. Esto se debe a que están en evidente contradicción con las concepciones clásicas de espacio y tiempo.

En efecto, supongamos que en el instante en que los orígenes de coordenadas de dos sistemas inerciales de referencia K y K_1 (fig. 206), que se mueven

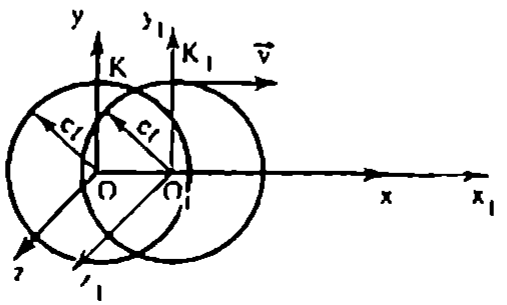


Fig. 206

uno respecto del otro con la velocidad v, coinciden, en dicho origen de coordenadas se produce un destello. En un tiempo t los sistemas se alejan uno de otro la distancia vt y la superficie de la onda esférica tendrá el radio ct. Los sistemas K y K_1 son equivalentes y la velocidad de la luz igual en el uno y en el otro. Por consiguiente, desde el punto de vista de un observador asociado al sistema de referencia K, el centro de la esfera se encuentra en el punto O, y desde el punto de vista de un observador asociado al sistema de referencia K_1, se encuentra en el punto O_1. Pero una misma superficie esférica no puede tener dos centros, O y O_1. Esta manifiesta contradicción se infiere de los razonamientos basados en los postulados de la teoría de la relatividad.

La contradicción efectivamente existe. Pero no dentro de la misma teoría de la relatividad, sino en los conceptos clásicos de espacio y tiempo, que cuando las velocidades son muy grandes no son válidos.

8.3. Relatividad de la simultaneidad

La causa de la inconsistencia de las concepciones clásicas del espacio y del tiempo consiste en haber supuesto erróneamente que es posible la transmisión instantánea de las interacciones y de las señales de un punto del espacio a otro. La existencia de una velocidad límite finita de transmisión de las interacciones hace necesario un profundo cambio de los conceptos habituales de espacio y tiempo, basados en la experiencia diaria. El concepto de *tiempo absoluto*, que transcurre de una vez y para siempre a un ritmo dado, totalmente independiente de la materia y su movimiento, es erróneo.

Admitiendo que las señales se transmiten instantáneamente, la afirmación de que dos hechos ocurren de modo simultáneo en dos puntos distantes en el espacio A y B tendrá un sentido absoluto. Se pueden colocar en los puntos A y B relojes y sincronizarlos por medio de señales instantáneas. Si una de estas señales se envía desde A, por ejemplo, a las 0 h 45 min y en este mismo instante, según el reloj que hay en B, llega al punto B, quiere decir que ambos relojes marcan la misma hora, es decir, marchan *sincrónicamente*. Si esta coincidencia no existe, los relojes se pueden *sincronizar* adelantando el reloj que marca menos tiempo en el instante en que se envía la señal.

Dos acontecimientos cualesquiera, por ejemplo, la caída de dos rayos, son simultáneos si ocurren cuando los relojes sincronizados marcan la misma hora.

Únicamente disponiendo en los puntos A y B relojes sincronizados se puede juzgar acerca de si dos acontecimientos cualesquiera ocurrieron en estos puntos simultáneamente o no. Pero, ¿cómo se pueden sincronizar los relojes que se encuentran a cierta distancia entre sí cuando la velocidad de propagación de las señales no es infinita?

Para sincronizar los relojes es natural que se recurra a las señales luminosas o, en general, a las electromagnéticas, ya que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es una magnitud constante, rigurosamente determinada.

Éste es precisamente el procedimiento que se utiliza para compobar los relojes por radio. Las señales horarias dan la posibilidad de sincronizar todos

Fig. 207

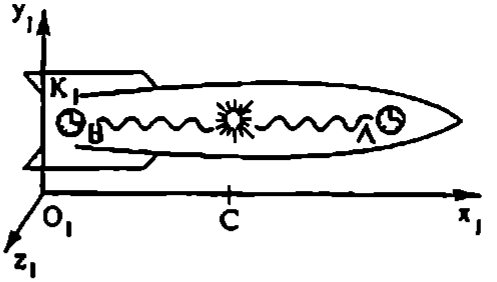
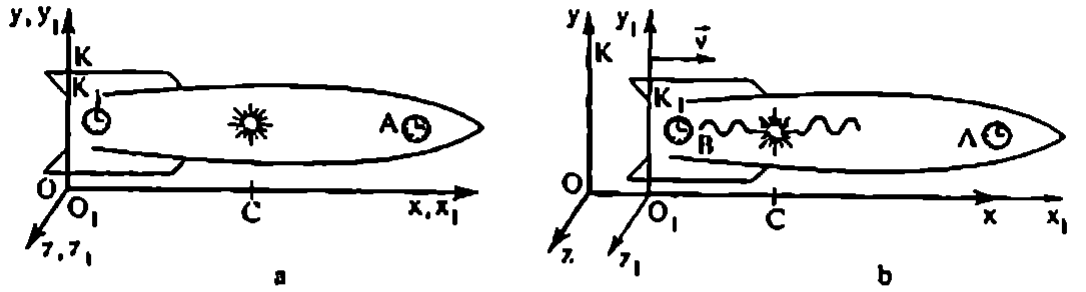


Fig. 208



los relojes con un reloj patrón exacto Conociendo la distancia desde la estación emisora hasta el receptor, se puede calcular el retraso de la señal. Esta corrección es insignificante y en la vida cotidiana carece de importancia. Pero cuando se trata de las enormes distancias cósmicas, su importancia puede ser notoria.

Analicemos mas detalladamente un método simple de sincronizar relojes que no requiere cálculo alguno. Supongamos que un cosmonauta desea saber si marchan a la par los relojes A y B situados en los extremos opuestos de la nave cósmica (fig. 207). Para esto, por medio de un foco, en reposo respecto de la nave y situado en el centro de ella, el cosmonauta produce un destello. La luz llega simultáneamente a ambos relojes Si los relojes marcan la misma hora en ese instante, están sincronizados.

Esto será así solamente con respecto al sistema de referencia K_1 asociado a la nave En el sistema de referencia K, respecto del cual se mueve la nave, no ocurre lo mismo. El reloj situado en la proa de la nave se aleja del punto en que se produjo el destello del foco y la luz, para alcanzar el reloj A, debe recorrer una distancia mayor que la mitad de la longitud de la nave (fig. 208, *a* y *b*) Por el contrario, el reloj B, situado en la popa, se acerca al punto en que se produjo el destello y el camino a recorrer por la señal luminosa es menor que la mitad de la longitud de la nave. Por consiguiente, un observador situado en el sistema K llegará a la conclusión de que las señales no llegan simultáneamente a ambos relojes.

Dos hechos cualesquiera que ocurran en los puntos A y B al mismo tiempo en el sistema K_1, no serán simultáneos en el sistema K Pero en virtud del principio de la relatividad, los sistemas K_1 y K son totalmente equivalentes A ninguno de ellos puede darse preferencia. Por lo tanto, hay que llegar a la conclusión de que la simultaneidad de los sucesos alejados en el espacio es relativa. La causa de la relatividad de la simultaneidad es, como se ha visto, el carácter finito de la propagación de las señales.

Precisamente en la relatividad de la simultaneidad está el secreto de la paradoja de las señales luminosas esféricas a que se hizo referencia en el § 8.2. La luz llega en el mismo instante a los puntos de la superficie esférica con centro en el punto O, únicamente desde el punto de vista de un observador que se encuentre en reposo respecto del sistema K. En cambio, desde el punto de vista de un observador asociado al sistema K_1, la luz llega a dichos puntos en distintos instantes.

También es justo, claro está, lo inverso, es decir, en el sistema K la luz llega a los puntos de la esfera, cuyo centro esta en O_1, en distintos instantes, y no simultáneamente, como le parece al observador que se encuentra en el sistema K_1.

De aquí se deduce que, en realidad, no existe tal paradoja.

8.4. Consecuencias fundamentales que se deducen de los postulados de la teoría de la relatividad

De los postulados de la teoría de la relatividad se infiere una serie de consecuencias muy importantes que se refieren a las propiedades del espacio y del tiempo. No vamos a detenernos en el fundamento relativamente complejo de estas consecuencias. Nos limitaremos a enunciarlas someramente.

RELATIVIDAD DE LAS DISTANCIAS. La distancia no es una magnitud absoluta, sino que depende de la velocidad con que se mueve el cuerpo respecto de un sistema de referencia dado.

Designemos por l_0 la longitud de una varilla en el sistema de referencia K respecto del cual la varilla está en reposo. En este caso la longitud l de dicha varilla en el sistema de referencia K_1, respecto del cual se mueve la varilla con la velocidad v, se determina por la fórmula

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \tag{8.1}$$

Como puede verse por esta fórmula, $l < l_0$. En esto consiste la contracción relativista de los cuerpos en los sistemas de referencia que se mueven uno respecto de otro.

RELATIVIDAD DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO. Supongamos que el intervalo de tiempo entre dos sucesos, que ocurren en el mismo punto de un sistema inicial K, es τ_0. Estos sucesos pueden ser, por ejemplo, dos toques de metrónomo que bate segundos.

Entonces el intervalo τ entre estos sucesos en el sistema de referencia K_1, que se mueve respecto del sistema K con la velocidad v, se expresa así:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{8.2}$$

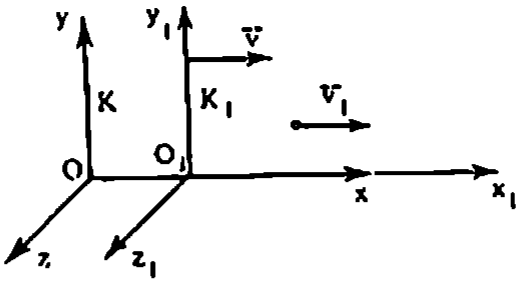


Fig. 209

Es evidente que $\tau > \tau_0$. Este es el efecto relativista de dilatación del tiempo en los sistemas de referencia en movimiento.

Si $v \ll c$, en las fórmulas (8.1) y (8.2) se puede despreciar la magnitud v^2/c^2. Entonces $l \approx l_0$ y $\tau \approx \tau_0$, es decir, la contracción relativista de los cuerpos y la dilatación del tiempo en el sistema de referencia móvil puede no tenerse en cuenta.

LEY RELATIVISTA DE LA COMPOSICIÓN DE VELOCIDADES. A los nuevos conceptos de espacio y tiempo corresponde una nueva ley de composición de las velocidades. Es evidente que la ley clásica de composición de las velocidades no puede ser válida, puesto que contradice la afirmación de que la velocidad de la luz en el vacío es constante.

Si un tren se mueve a la velocidad v y en uno de sus vagones se propaga una onda luminosa en el sentido en que avanza el tren, su velocidad respecto de la Tierra debe ser igual a c, y no a $c + v$. La nueva ley de composición de las velocidades debe conducir al resultado requerido.

Escribamos la ley de composición de las velocidades para el caso particular en que un cuerpo se mueve a lo largo del eje X_1 del sistema de referencia K_1 (fig. 209) que, a su vez, se mueve con la velocidad v respecto del sistema K. Se supone que durante el movimiento los ejes de coordenadas X y X_1 coinciden todo el tiempo y los ejes de coordenadas Y e Y_1, Z y Z_1 permanecen paralelos.

Llamemos v_1 a la velocidad del cuerpo respecto de K_1, y v_2 a su velocidad respecto de K. Entonces, de acuerdo con la ley relativista de composición de las velocidades

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}} \tag{8.3}$$

Si $v \ll c$ y $v_1 \ll c$, el término $v_1 v/c^2$ que figura en el denominador se puede despreciar y en vez de (8.3) se obtiene la ley clásica de composición de las velocidades.

$$v_2 \approx v_1 + v.$$

Y si $v_1 = c$, la velocidad v_2 también es igual a c, como requiere el segundo postulado de la teoría de la relatividad. En efecto,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c\,\frac{c + v}{c + v} = c.$$

Una propiedad notable de la ley relativista de composición de las velocidades es que, cualesquiera que sean las velocidades v_1 y v (naturalmente menores que c), la velocidad resultante v_2 nunca es mayor que c.

En el caso límite, cuando $v_1 = v = c$, se obtiene

$$v_2 = \frac{2c}{2} = c$$

Las velocidades $v > c$ son imposibles. A esta conclusión se puede llegar también por medio de razonamientos formales. Efectivamente, si $v > c$, las fórmulas (8.1) y (8.2) carecen de sentido, ya que tanto la longitud como el tiempo se hacen imaginarios

¿?

1. ¿Qué afirmaciones sirven de base para la teoría de la relatividad?
2. ¿En qué difiere el primer postulado de la teoría de la relatividad del principio de ésta en la mecánica?
3. ¿Qué sucesos llevan el nombre de simultáneos?
4. ¿Para qué velocidades de movimiento la ley relativista de composición de aquéllas se transforma en la clásica?
5. ¿En qué consiste la diferencia esencial de la velocidad de la luz respecto de las velocidades con que se mueven todos los demás cuerpos?

8.5. Dependencia de la masa respecto de la velocidad. Dinámica relativista

Con los nuevos conceptos de espacio-tiempo no concuerdan las leyes del movimiento de la mecánica de Newton cuando las velocidades son grandes. Sólo si las velocidades son pequeñas, es decir, cuando son justos los conceptos de espacio y tiempo clásicos, la segunda ley de Newton

$$m\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \tag{8.4}$$

no cambia de forma al pasar de un sistema inercial de referencia a otro (es decir, se cumple el principio de la relatividad).

Pero cuando las velocidades de movimiento son grandes, esta ley, en su forma habitual (clásica), no es correcta

De acuerdo con la segunda ley de Newton (8.4), una fuerza constante, actuando sobre un cuerpo durante mucho tiempo, puede comunicarle una velocidad tan grande como se quiera. Pero en realidad la velocidad de la luz en el vacío es la velocidad límite y, cualesquiera que sean las condiciones, un cuerpo no puede moverse a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío Se requiere un cambio muy pequeño en la ecuación del movimiento de los cuerpos para que ésta sea correcta cuando las velocidades son grandes. Previamente vamos a pasar a la forma de escribir la segunda ley de la dinámica que utilizó el propio Newton:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \tag{8.5}$$

donde $p = mv$ es el impulso del cuerpo. En esta fórmula se suponía que la masa del cuerpo es independiente de la velocidad.

Es asombroso que incluso a grandes velocidades la ecuación (8.5) no cambia de forma. La variación sólo afecta a la masa. Cuando la velocidad de un cuerpo aumenta, su masa no permanece constante, sino que crece. Este incremento de la masa es tanto mayor cuanto más se aproxima la velocidad con que se mueve el cuerpo a la velocidad de la luz c.

La dependencia de la masa respecto de la velocidad puede hallarse partiendo de la suposición de que la ley de conservación del impulso es justa también con los nuevos conceptos de espacio y tiempo. Los cálculos son demasiado complejos. Daremos únicamente el resultado final.

Si por m_0 se designa la masa del cuerpo en reposo, entonces la masa m del mismo cuerpo moviéndose a la velocidad v se determina por la fórmula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.6)$$

En la fig. 210 se da la gráfica de la masa del cuerpo en función de su velocidad.

Cuando las velocidades son mucho menores que la de la luz, la expresión del denominador en el segundo miembro de la fórmula (8.6) difiere muy poco de la unidad. Así, a la velocidad de un cohete cósmico moderno $v \approx 10$ km/s, se obtiene que

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0{,}99999999944\,.$$

Por eso no es extraño que a velocidades relativamente pequeñas sea imposible apreciar el aumento de la masa. Pero las partículas elementales alcanzan en los aceleradores de partículas cargadas modernos velocidades

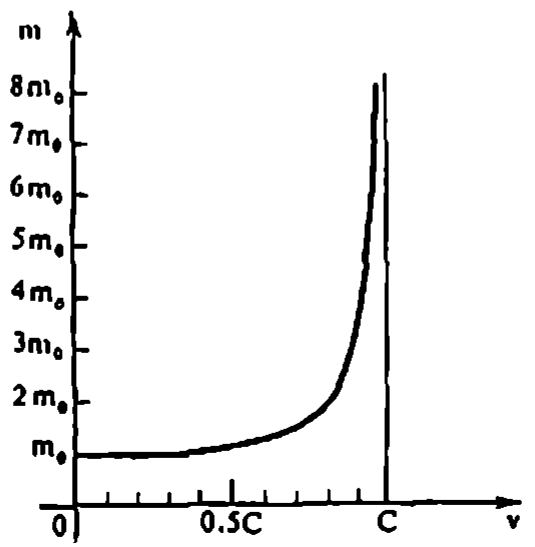


Fig. 210

enormes Si la velocidad de una partícula sólo es 90 km/s menor que la velocidad de la luz, su masa aumenta 40 veces. Los potentes aceleradores de electrones son capaces de acelerar estas partículas hasta velocidades tan sólo 35 ó 40 m/s menores que la velocidad de la luz. En estas condiciones la masa del electrón aumenta 2000 veces, aproximadamente, y el electrón adquiere una masa mayor que la del protón. Para mantener este electrón en una órbita circular, sobre él debe actuar, por parte del campo magnético, una fuerza 2000 veces mayor que la que podría suponerse de no tener en cuenta que la masa depende de la velocidad. Para calcular las trayectorias de las partículas rápidas no sirve la mecánica de Newton.

Tomando en consideración (8.6), el impulso del cuerpo es

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{8.7}$$

La ley fundamental de la dinámica relativista se escribe en la forma antigua.

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

Pero el impulso del cuerpo se determina aquí por la fórmula (8.7), y no simplemente por el producto $m_0 \vec{v}$.

Así, pues, la masa, que desde los tiempos de Newton, es decir, durante dos siglos y medio, se había considerado invariable, en realidad depende de la velocidad.

A medida que aumenta la velocidad del movimiento, la masa del cuerpo, que determina sus propiedades inerciales, también aumenta Cuando $v \to c$ la masa del cuerpo, de acuerdo con la ecuación (8.6), crece indefinidamente ($m \to \infty$); por eso la aceleración tiende a cero y la velocidad deja prácticamente de aumentar, aunque la fuerza siga actuando indefinidamente.

La necesidad de utilizar las ecuaciones relativistas del movimiento para calcular los aceleradores de partículas cargadas significa que, en nuestros días, la teoría de la relatividad se ha convertido en una ciencia de ingeniería.

Las leyes de la mecánica de Newton se pueden considerar como un caso particular de la mecánica relativista, correctas cuando las velocidades con que se mueven los cuerpos son mucho menores que la velocidad de la luz.

8.6. Sincrofasotrón

En los aceleradores potentes modernos –*sincrofasotrones*– se utiliza el principio del paso, repetido muchas veces, de las partículas cargadas (principalmente protones) a través de intervalos aceleradores en los cuales se concentra un campo eléctrico variable muy intenso.

El movimiento, siguiendo una trayectoria aproximadamente circular, se asegura por medio de un campo magnético. Este campo hace que varíe la

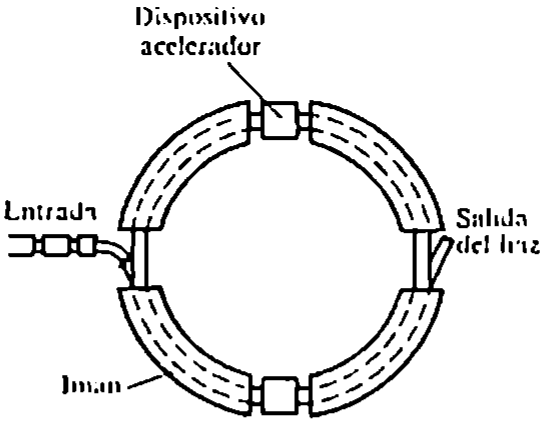
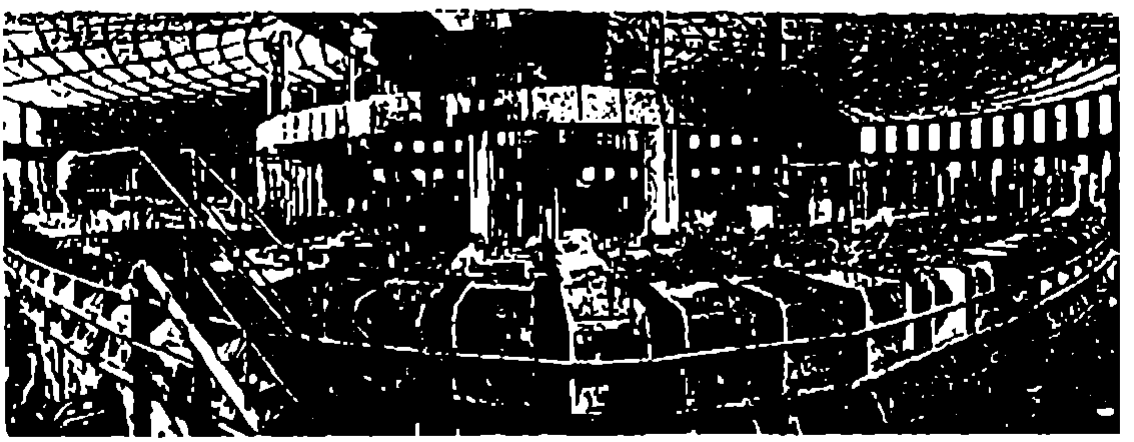


Fig. 211

dirección de la velocidad de las partículas, sin alterar su energía (véase el libro "Física 3" de la editorial MIR).

El sincrofasotrón tiene la forma de un anillo de grandes dimensiones. Las partículas se mueven por una cámara de vacío situada dentro de un sistema de electroimanes. La trayectoria de cada partícula está formada por unos cortos trozos rectilíneos aislados y unos arcos de circunferencia (fig. 211). Una parte de los trozos rectilíneos se utiliza para colocar los electrodos entre los cuales se crea el campo eléctrico acelerador. En otros trozos rectilíneos se encuentran los aparatos para introducir las partículas cargadas en el acelerador y para que salgan de él los haces de partículas aceleradas hasta velocidades relativistas.

Como cada paso de la partícula, por ejemplo, del protón, por el intervalo acelerador hace que aumente su velocidad (y, por lo tanto, su masa), el campo magnético que curva su trayectoria no puede permanecer constante. Para que el radio de curvatura de la trayectoria se conserve invariable, el campo magnético debe aumentar a medida que las partículas se van acelerando. Al mismo tiempo (sincrónicamente) que varía el campo magnético debe variar, de un modo rigurosamente determinado, el campo eléctrico alternativo en los intervalos aceleradores. Para que el protón, que cada vez se mueve a mayor velocidad, llegue al intervalo acelerador en el instante en que el campo eléctrico está dirigido en el sentido de su velocidad, la frecuencia con que varía el campo eléctrico



Sincrofasotrón de 10 GeV del Instituto de Investigaciones Nucleares de la URSS (Dubna)

también debe aumentar a medida que crece la aceleración. La coordinación necesaria entre el aumento del campo magnético y de la frecuencia del eléctrico se calcula valiéndose de la dinámica relativista El sincrofasotrón es un aparato relativista. En la URSS el primer aparato de este tipo, para energías de 10 mil millones de eV[1], fue construido en la ciudad de Dubna en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares

El acelerador más grande de la Unión Soviética es el sincrofasotrón de Sérpujov. La masa total de sus imanes es de 20 000 t. En la longitud de una vuelta (cerca de 1,5 km) los protones que se aceleran recorren una diferencia de potencial total de 350 mil V y adquieren, respectivamente, la energía de 350 000 eV En un ciclo completo de aceleración los protones adquieren una energía de más de 70 mil millones de eV.

8.7. Relación entre la masa y la energía

Pasamos ahora a estudiar la consecuencia más importante de la teoría de la relatividad, que desempeña uno de los papeles más importantes en la física nuclear y en la física de las partículas elementales. Nos referimos a la *relación universal entre la energía y la masa.*

La relación entre la energía y la masa se deduce inevitablemente de la ley de conservación de la energía y del hecho de que la masa del cuerpo dependa de la velocidad con que se mueve Esto se puede ver en un simple ejemplo Al calentar el gas que hay en un recipiente se le comunica una energía determinada. La velocidad del movimiento térmico caótico de las moléculas depende de la temperatura y aumenta a medida que se calienta el gas. El aumento de la velocidad del movimiento de las moléculas, de acuerdo con la fórmula (8.6), significa un incremento de la masa de todas las moléculas. Por consiguiente, la masa del gas que hay en el recipiente aumenta al crecer su energía interna Entre la masa del gas y su energía existe relación.

RELACIÓN ENTRE LA MASA Y LA ENERGÍA EN LOS MOVIMIENTOS LENTOS. Lo más fácil es establecer la relación entre la masa y la energía basándose en el ejemplo del movimiento de un cuerpo con la velocidad v, mucho menor que la velocidad de la luz c. Para eso hallamos la expresión aproximada de la dependencia de la masa respecto de la velocidad para $v \ll c$. El denominador de la fórmula (8.6) se puede escribir así

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)^2 - \frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4}}$$

Despreciando la magnitud pequeña $^1/_4\, v^4/c^4$ se obtiene.

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}.$$

---

[1] El ELECTRÓN-VOLTIO (eV) es una unidad de energía que no figura en el SI, pero se usa mucho en la física nuclear: 1 eV = $1{,}60207 \cdot 10^{-19}$ J. Un electrón adquiere la energía de 1 eV cuando recorre una diferencia de potencial de 1 V

Por lo tanto

$$m \approx \frac{m_0}{1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}}$$

Multiplicando el numerador y el denominador por $1 + {}^1/_2\, v^2/c^2$ y volviendo a despreciar el término ${}^1/_4\, v^4/c^4$, se llega a la fórmula aproximada siguiente:

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \frac{1}{c^2} \tag{8.8}$$

De aquí se sigue que la variación de la masa del cuerpo $\Delta m = m - m_0$, cuando su energía cinética aumenta en $\Delta W_c = {}^1/_2 m_0 v^2$ se expresa así:

$$\Delta m = \frac{\Delta W_c}{c^2}.$$

Esto significa que el incremento de la masa del cuerpo cuando su velocidad aumenta es igual a la energía cinética comunicada al cuerpo, dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz.

FÓRMULA DE EINSTEIN. En la teoría de la relatividad esta deducción se generaliza ampliamente. Valiéndose de esta teoría Einstein estableció su fórmula, magnífica por su sencillez y comunidad, que relaciona la energía con la masa:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{8.9}$$

La energía de un cuerpo o sistema de cuerpos es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. En toda la física sólo hay dos o tres fórmulas tan simples y universales que relacionen magnitudes físicas fundamentales.

Si varía la energía del sistema también varía su masa:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \tag{8.10}$$

Como el coeficiente $1/c^2$ es muy pequeño, sólo son posibles las variaciones apreciables de la masa cuando las variaciones de la energía son muy grandes. En las reacciones químicas o cuando se calientan cuerpos en condiciones normales, las variaciones de la energía son tan pequeñas que las correspondientes variaciones de la masa no se pueden revelar por vía experimental. Una cafetera caliente tiene más masa que cuando está fría; pero incluso con las balanzas más sensibles no se puede apreciar esta diferencia. Únicamente en las transformaciones de los núcleos atómicos y de las partículas elementales son tan grandes las variaciones de la energía, que las variaciones de la masa relacionadas con ellas son ya apreciables.

En la explosión de una bomba de hidrógeno se libera una cantidad de energía enorme (de cerca de 10^{17} J). Esta energía es mayor que toda la energía eléctrica que se produce en el mundo durante varios días. La energía desprendida se traslada junto con la radiación. Esta última posee no sólo energía, sino también masa, la cual es igual, aproximadamente, al 0,1% de la masa de los materiales iniciales.

ENERGÍA EN REPOSO. Cuando las velocidades del movimiento del cuerpo son pequeñas ($v \ll c$), la fórmula (8.9) se puede escribir así[1]:

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \tag{8.11}$$

Aquí el segundo término es la energía cinética ordinaria del cuerpo. Mayor interés y novedad ofrece el primer término: él determina la energía del cuerpo cuando la velocidad es nula, es decir, la llamada *energía en reposo* E_0:

$$E_0 = m_0 c^2 \tag{8.12}$$

Este resultado es sorprendente. Todo cuerpo, por el sólo hecho de su existencia, posee energía, y ésta es proporcional a la masa en reposo m_0.

Cuando las partículas elementales, QUE POSEEN masa en reposo, se transforman en partículas en que $m_0 = 0$, la energía en reposo se transforma totalmente en energía cinética de las partículas recién formadas.

Este hecho es la demostración experimental más evidente de la existencia de la energía en reposo.

¿ ?

1. Escriba la fórmula de la dependencia entre la masa de un cuerpo y la velocidad con la que éste se mueve.
2. ¿Bajo qué condición se puede considerar que la masa de un cuerpo no depende de la velocidad?
3. ¿En qué consiste la ley de la relación entre la masa y la energía?
4. ¿Qué es la energía en reposo?
5. ¿Por qué cuando un cuerpo se calienta no se logra apreciar experimentalmente el aumento de su masa?

Ejercicio 11

1. Desde el punto de vista de un observador que se halla en un tren en marcha, la caída de dos rayos, uno en el punto *A* (delante del tren) y otro en el punto *B* (detrás del tren) fue simultánea. ¿Qué rayo cayó antes, desde el punto de vista de un observador situado en tierra?
2. ¿Cuál es la velocidad de un electrón si su masa es 40 000 veces mayor que la masa en reposo?
3. Una cantidad de agua igual a 1 kg se calienta 50 K. ¿Cuánto aumentará su masa?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 8

La teoría especial de la relatividad de Einstein se basa en dos postulados.

El principio de la relatividad es el postulado principal de esta teoría. Se

---

[1] En este caso se utiliza la expresión aproximada de la masa (8.8).

enuncia así: todos los procesos de la naturaleza transcurren de igual forma en todos los sistemas inerciales de referencia

Según el segundo postulado, la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los sistemas inerciales de referencia. Esta velocidad no depende de la velocidad de la fuente ni de la velocidad del receptor de la señal luminosa.

La teoría de la relatividad es una nueva concepción del espacio y del tiempo que ha venido a sustituir las viejas representaciones clásicas. Según la teoría de la relatividad, la simultaneidad de los sucesos, la distancia y los intervalos de tiempo no son magnitudes absolutas, sino relativas. Dependen del sistema de referencia.

De la teoría de la relatividad se infiere que la velocidad de la luz en el vacío es la máxima velocidad posible de transmisión de las interacciones en la naturaleza.

Cuando la velocidad de un cuerpo aumenta, su masa m no permanece constante, sino que crece de acuerdo con la fórmula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

en la que m_0 es la masa en reposo del cuerpo. Respectivamente, el impulso relativista del cuerpo se expresa por la fórmula

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Teniendo en cuenta esta expresión del impulso, la ley fundamental de la dinámica relativista se puede escribir en la misma forma que la segunda ley de Newton

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

La consecuencia más importante de la teoría de la relatividad para la física nuclear y la física de las partículas elementales es la relación entre la masa y la energía. La energía E de un cuerpo o sistema de cuerpos es igual a su masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

La expresión $E_0 = m_0 c^2$ representa la energía en reposo.

9 RADIACIÓN Y ESPECTROS

9.1. Tipos de radiación. Fuentes de luz

Hasta aquí hemos venido estudiando la propagación de las ondas luminosas. Ahora vamos a tratar de la radiación de la luz por los cuerpos.

La luz está compuesta por ondas electromagnéticas cuya longitud va desde $4 \cdot 10^{-5}$ hasta $8 \cdot 10^{-5}$ cm. Estas ondas electromagnéticas son emitidas por las partículas cargadas cuando se mueven con aceleración. Estas partículas cargadas entran en la composición de los átomos que forman la sustancia. Pero si se desconoce la estructura del átomo es imposible decir nada fidedigno acerca del mecanismo de la radiación. Sólo está claro que dentro del átomo no hay luz, lo mismo que dentro de una cuerda de piano no hay sonido. Así como la cuerda empieza a sonar cuando la golpea el macillo, los átomos generan luz cuando se les excita. Para que un átomo comience a radiar hay que transmitirle cierta cantidad de energía. Al radiar, el átomo pierde la energía recibida, y para que la sustancia siga emitiendo luz continuamente es necesario suministrar energía del exterior a sus átomos.

RADIACIÓN TÉRMICA. La forma de radiación más simple y extendida es la *térmica*, en la cual la energía que pierden los átomos al emitir luz es compensada por la energía del movimiento térmico de los mismos átomos (o moléculas) del cuerpo radiante. Cuanto más elevada sea la temperatura del cuerpo, tanto más rápidamente se moverán los átomos. En los choques de los átomos (o moléculas) rápidos entre sí una parte de su energía cinética se convierte en energía de excitación de los átomos, que después emiten luz.

La radiación del Sol es una radiación térmica. También es una fuente térmica de luz la lámpara eléctrica de incandescencia. Ésta es una fuente de luz muy cómoda, pero poco económica. Sólo un 12%, aproximadamente, de toda la energía de la corriente eléctrica que se desprende en el filamento de la lámpara se transforma en energía luminosa. Finalmente, otra fuente térmica de luz es la llama. En ella los gránulos de hollín (partículas de combustible que no han tenido tiempo de arder) se ponen candentes, a expensas de la energía que desprende el combustible al quemar, y emiten luz.

ELECTROLUMINISCENCIA. La energía que necesitan los átomos para emitir luz la pueden tomar de fuentes no térmicas. Durante la descarga en gases el campo eléctrico comunica a los electrones una gran energía cinética. Los electrones rápidos experimentan choques inelásticos con los átomos. Parte de la energía cinética de los electrones se gasta en excitar los átomos. En tanto que los átomos así excitados ceden la energía en forma de ondas luminosas. En virtud de esto la descarga en un gas va acompañada de emisión de luz. Esto es la *electroluminiscencia*.

Serguéi Ivanovich Vavilov (1891–1951), eminente físico, hombre de Estado y figura social soviética, presidente de la Academia de Ciencias de la URSS de 1945 a 1951. Sus principales trabajos científicos versan sobre óptica física y, en primer lugar, sobre fotoluminiscencia. Su estudio de la polarización de la luz luminiscente llevó al esclarecimiento de la naturaleza de los radiadores elementales. Bajo su dirección se elaboró la tecnología para fabricar las lámparas de "luz solar" y se desarrolló el método de análisis por luminiscencia de la composición química de las sustancias. También bajo su dirección P. A. Cherenkov descubrió en 1934 la radiación de luz por los electrones que se mueven en un medio con mayor velocidad que la luz en dicho medio.

La aurora boreal es una manifestación de la electroluminiscencia. Los flujos de partículas cargadas emitidos por el Sol son capturados por el campo magnético de la Tierra. En los polos magnéticos de nuestro planeta estos flujos excitan los átomos que hay en las capas superiores de la atmósfera, lo que hace que estas capas se iluminen. La electroluminiscencia se utiliza en los tubos para anuncios luminosos.

CATODOLUMINISCENCIA. La luminiscencia que se produce en los sólidos al bombardearlos con electrones se llama *catodoluminiscencia* o *luminiscencia catódica*. En virtud de la catodoluminiscencia se iluminan las pantallas de los tubos catódicos de televisión.

QUIMIOLUMINISCENCIA. Durante ciertas reacciones químicas que se desarrollan con desprendimiento de energía, una parte de ésta se transforma directamente en energía luminosa. La fuente de luz, en este caso, permanece fría (es decir, a la temperatura ambiente). Este fenómeno recibe el nombre de *quimioluminiscencia*. Sin duda son muchos los que han tenido ocasión de observarla. En verano, por la noche, se pueden ver unos insectos muy interesantes, las luciernagas o gusanillos de luz. En su cuerpo "arde" una pequeña "linterna" verde. Si los mismos se cogen uno no se quema los dedos. La manchita luminosa del abdomen de la luciernaga tiene casi la misma temperatura que el aire que la rodea. La propiedad de emitir luz también la poseen otros organismos: bacterias, insectos y muchos peces que viven a gran profundidad, donde no llega la luz del Sol. Algunas veces emiten luz en la oscuridad los pedacitos de madera en putrefacción.

Lamentablemente, hasta ahora no se han conseguido crear fuentes de luz prácticas cuya acción se base en la quimioluminiscencia.

FOTOLUMINISCENCIA. La luz que incide sobre una sustancia en parte es reflejada y parcialmente absorbida. En la mayoría de los casos la energía absorbida sólo sirve para calentar los cuerpos. No obstante, algunos cuerpos

empiezan a emitir luz bajo la influencia directa de la radiación que sobre ellos incide. En esto consiste la *fotoluminiscencia*. La luz excita los átomos de la sustancia (o sea, aumenta su energía interna) y luego ellos mismos emiten luz. Por ejemplo, las pinturas luminosas con que se recubren muchas figurillas para los árboles de navidad emiten luz después de haber sido irradiadas.

La luz emitida en la fotoluminiscencia tiene, por regla general, mayor longitud de onda que la luz que excitó la luminiscencia. Esto se puede observar haciendo un experimento. Si sobre un recipiente que contenga fluoresceína (colorante orgánico) se dirige un haz luminoso que atraviese previamente un filtro óptico violeta, el líquido empieza a emitir luz amarillo-verdosa, es decir, luz cuya longitud de onda es mayor que la de la luz violeta.

El fenómeno de la fotoluminiscencia se utiliza mucho en las lámparas de "luz solar". El físico soviético S. I. VAVILOV propuso recubrir la superficie interna de los tubos de descarga con sustancias capaces de emitir luz bajo la influencia de la radiación de onda corta de la descarga en gas. Las lámparas de luz solar son, aproximadamente, tres o cuatro veces más económicas que las habituales lámparas de incandescencia.

9.2. Espectros y aparatos espectrales

DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN EL ESPECTRO

Ninguna fuente de luz produce *luz monocromática*, es decir, de una longitud de onda rigurosamente determinada. De esto nos convencen los experimentos de descomposición de la luz en un espectro por medio de un prisma, así como los de interferencia y de difracción.

La energía que lleva consigo la luz de la fuente está distribuida de un modo determinado entre las ondas de todas las longitudes que entran en la composición del haz luminoso. Puede decirse también que la energía está distribuida entre las frecuencias, ya que la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas por una simple expresión

$$\lambda\nu = c,$$

Toda fuente de luz se caracteriza por la energía total que emite en la unidad de tiempo. La energía radiada no se distribuye uniformemente entre las ondas de distinta longitud. Por eso una característica muy importante de la radiación es la distribución de la energía emitida en la unidad de tiempo entre las longitudes de onda o frecuencias.

Esta distribución puede hallarse empíricamente. Para esto, con un prisma, hay que obtener el espectro de la radiación, por ejemplo, de un arco voltaico, y medir la energía luminosa correspondiente a pequeños intervalos espectrales de anchura $\Delta\nu$. A ojo no es posible apreciar (ni siquiera aproximadamente) la distribución de la energía. El ojo humano posee sensibilidad selectiva para con la luz: su sensibilidad máxima se encuentra en la región verde-amarilla del espectro. Lo mejor es valerse de la propiedad que tiene el cuerpo negro de absorber casi totalmente la luz de todas las longitudes de onda y de calentarse a expensas de la energía luminosa. Basta medir la temperatura del cuerpo y por ella formarse una idea de la cantidad de energía absorbida en la unidad de tiempo.

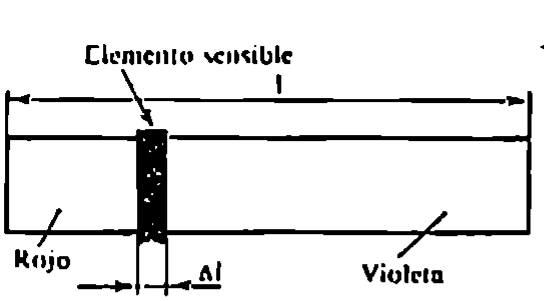


Fig. 212

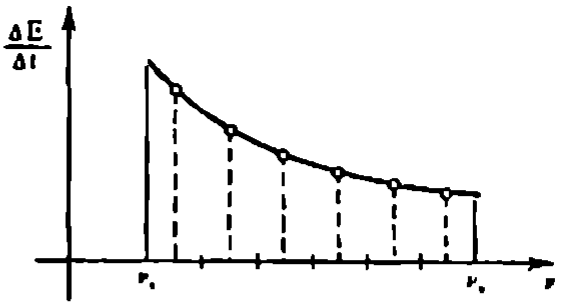


Fig. 213

El termometro ordinario tiene demasiado poca sensibilidad para poderlo utilizar con éxito en estos experimentos. Para medir la temperatura se necesitan instrumentos más sensibles. Se puede emplear un termómetro eléctrico de resistencia en el cual el elemento sensible tenga la forma de lámina metálica delgada (véase "Física 3" de la editorial MIR). Esta lámina debe cubrirse de una capa delgada de negro de humo, que absorbe casi totalmente la luz de cualquier longitud de onda.

La lámina del termómetro sensible al calentamiento debe situarse ya sea en uno o bien en otro lugar del espectro (fig. 212). A todo el espectro visible, cuya longitud l va desde los rayos rojos hasta los violáceos inclusive, le corresponde el intervalo de frecuencias que se extiende desde ν_r hasta ν_v. A la anchura Δl de la lamina ennegrecida corresponde un pequeño intervalo $\Delta\nu$. Por el calentamiento de esta lámina se puede apreciar la cantidad de energia luminosa correspondiente al intervalo de frecuencia $\Delta\nu$. Desplazando la lámina a lo largo del espectro se pone de manifiesto que la mayor parte de la energia corresponde a la parte roja del espectro, y no a la amarillo-verdosa, como parece a simple vista.

Con los resultados de estos experimentos se puede construir la curva de la energia radiada en la unidad de tiempo en función de la frecuencia. La energia de la radiación se determina por la temperatura de la lámina, y la frecuencia no es difícil de hallar si el instrumento que se utiliza para descomponer la luz está graduado, es decir, si se conoce la frecuencia que corresponde a cada parte del espectro

Tomando sobre el eje de abscisas los valores de las frecuencias correspondientes a los centros de los intervalos $\Delta\nu$, y sobre el eje de ordenadas la energia $\Delta E/\Delta t$ absorbida por el instrumento en la unidad de tiempo, se obtiene una serie de puntos por los cuales se puede trazar una curva suave (fig. 213). Esta curva da una idea clara de cómo se distribuye la energia luminosa en la parte visible del espectro de la luz del arco voltaico

APARATOS ESPECTRALES. Para el análisis espectral exacto ya no sirven dispositivos tan simples como lo son la rendija estrecha, para limitar el haz luminoso, y el prisma. El dispositivo más perfecto, en que se utiliza un prisma y una lente (véase la fig. 188), propuesto por Newton, tampoco es totalmente satisfactorio. Se necesitan dispositivos que den un espectro nitido, es decir, que separen bien las ondas de distinta longitud y que no permitan (o casi no permitan) que distintas partes del espectro se superpongan. Estos dispositivos

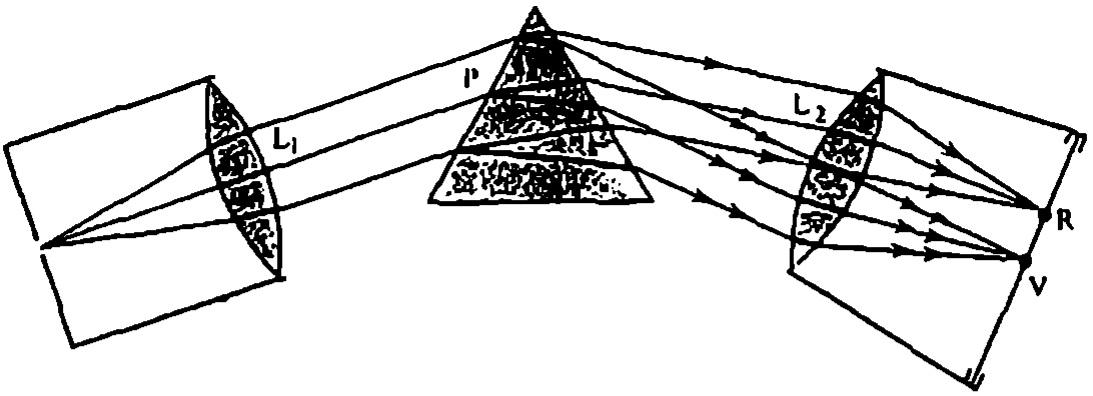


Fig. 214

se llaman *aparatos espectrales*. La parte fundamental de un aparato espectral suele ser un prisma o una red de difracción.

Veamos el esquema de la estructura de un aparato espectral de prisma (fig. 214). La radiación que se analiza entra primero en la parte del aparato denominada *colimador*. Este consiste en un tubo, uno de cuyos extremos está cerrado por una pantalla opaca con una rendija estrecha, y en el otro hay una lente convergente L_1. La rendija se encuentra en el plano focal de la lente. Por eso el haz luminoso divergente, que viniendo de la rendija incide sobre la lente, emerge de ella en forma de haz paralelo y cae sobre el prisma P.

Como a las distintas frecuencias corresponden índices de refracción diferentes, del prisma salen haces paralelos cuyas direcciones no coinciden. Estos haces inciden sobre la lente L_2. En el plano focal de esta lente hay una pantalla, que puede ser un vidrio esmerilado mate o una placa fotográfica. La lente L_2 enfoca los haces de rayos paralelos sobre la pantalla y, en vez de una imagen de la rendija, se obtiene toda una serie de imágenes. A cada frecuencia (o, más exactamente, a cada estrecho intervalo espectral) corresponde una imagen. Todas estas imágenes juntas forman el espectro.

El aparato que acabamos de describir es un *espectrógrafo*. Si en lugar de la segunda lente y la pantalla se utiliza un anteojo para la observación visual de los espectros, el aparato recibe el nombre de *espectroscopio*. Los prismas y otros elementos de los aparatos espectrales no siempre se hacen de vidrio. A veces se utilizan también materiales transparentes como el cuarzo, la sal gema y otros. Esto se debe a que el vidrio, que es transparente para las ondas electromagnéticas del espectro visible, absorbe intensamente las ondas de otras longitudes.

9.3. Tipos de espectros

La composición espectral de la radiación de diferentes sustancias es muy diversa. Pero, a pesar de esto, todos los espectros, como muestra la experiencia, se pueden dividir en tres tipos que difieren mucho entre sí.

ESPECTROS CONTINUOS. El espectro solar o el de una lámpara de arco es *continuo*, es decir, en él están representadas todas las longitudes de onda. En

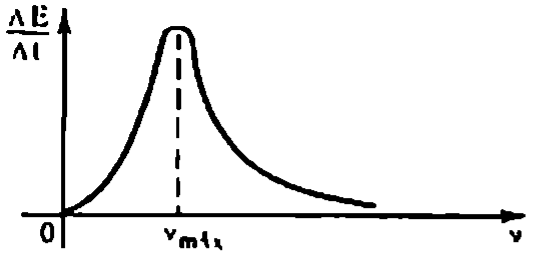


Fig. 215

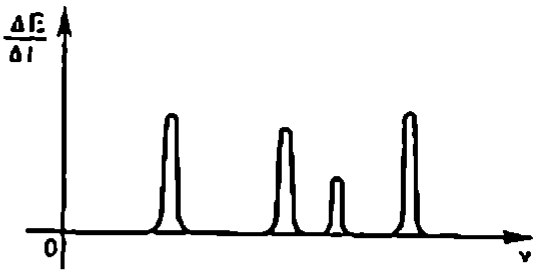


Fig. 216

este espectro no existen interrupciones y en la pantalla del espectrografo se puede ver una franja multicolor continua (fig. V, 1 de las láminas en color).

La distribución de la energía entre las frecuencias (o longitudes de onda) es distinta para cuerpos diferentes. Así, por ejemplo, un cuerpo de superficie muy negra radia ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, pero la curva de la energía en función de la frecuencia tiene el máximo para una frecuencia determinada $\nu_{máx}$ (fig. 215). Las energías de la radiación correspondiente a las frecuencias más pequeñas ($\nu \to 0$) y muy grandes ($\nu \to \infty$) son insignificantes. A medida que aumenta la temperatura el máximo de la energía de radiación se desplaza hacia la parte de las ondas cortas.

Los espectros continuos los dan, como muestra la experiencia, los cuerpos en estado sólido o líquido. Para obtener el espectro continuo hay que calentar el cuerpo hasta alta temperatura.

El carácter del espectro continuo y el propio hecho de su existencia se deben no sólo a las propiedades de los distintos átomos que irradian, sino también, y en alto grado, a la interacción de los átomos entre sí. Los gases no dan espectro continuo. Pero los líquidos y los sólidos se diferencian de los gases, en primer lugar, porque las interacciones entre sus átomos son muy intensas.

También produce un espectro continuo el plasma de alta temperatura. El plasma emite ondas electromagnéticas principalmente cuando los electrones chocan con los iones.

ESPECTROS DE RAYAS. Introduzcamos en la pálida llama de un mechero de gas un trocito de amianto humedecido en una solución de sal común. Si se observa la llama con un espectroscopio, sobre el fondo apenas distinguible del espectro continuo de aquélla, se destaca una raya amarilla brillante (fig. V, 2 de las láminas en color). Esta raya amarilla la da el vapor de sodio que se origina al desintegrarse las moléculas de sal común en la llama. En la misma lámina en color se dan también los espectros del hidrógeno y del helio. Cada uno de ellos es como una "empalizada" de rayas de color de distinto brillo, separadas por anchas franjas oscuras. Éstos son los llamados *espectros de rayas*. La existencia de un espectro de rayas significa que la sustancia emite luz sólo de longitudes de onda perfectamente determinadas (o, más exactamente, en determinados intervalos espectrales muy estrechos). En la fig. 216 se ve la distribución aproximada de la energía en un espectro de rayas. Cada raya tiene una anchura finita.

Los espectros de rayas los dan todas las sustancias en estado gaseoso atómico (no molecular). En este caso la luz la emiten los átomos, que

prácticamente no interaccionan entre sí. Este es el tipo mas fundamental de los espectros.

Los átomos aislados de un elemento químico dado emiten longitudes de onda rigurosamente determinadas.

Para observar los espectros de rayas se utiliza generalmente la luz que el vapor de la sustancia produce en la llama o la luz de una descarga en un tubo lleno del gas que se analiza

Si aumenta la densidad del gas elemental, las distintas rayas del espectro se ensanchan y, finalmente, cuando la densidad del gas es muy grande, la interacción de los átomos se hace considerable y las rayas empiezan a superponerse unas a otras formando un espectro continuo.

ESPECTROS DE BANDAS. Un espectro de bandas está formado por franjas aisladas, separadas por intervalos oscuros. Utilizando un aparato espectral muy bueno se puede descubrir que cada banda es el conjunto de un gran número de rayas muy próximas entre sí

A diferencia de los espectros de rayas, los espectros de bandas son creados no por átomos, sino por moléculas no ligadas o ligadas débilmente unas con otras.

Para observar los espectros moleculares, lo mismo que para observar los espectros de rayas, se utiliza generalmente la luz que dan los vapores del gas en la llama o la de la descarga en el gas.

ESPECTROS DE ABSORCIÓN. Todas las sustancias cuyos átomos se encuentran en estado excitado emiten ondas luminosas cuya energía está distribuida de un modo determinado entre las longitudes de onda. La absorción de la luz por una sustancia también depende de la longitud de la onda. Así, un vidrio rojo deja pasar las ondas correspondientes a la luz roja ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ cm) y absorbe todas las demas

Si a través de un gas frío, que no irradia, se hace pasar luz blanca, sobre el fondo del espectro continuo de la fuente aparecen rayas oscuras (véase la fig. V, 5–8 de las láminas en color). El gas absorbe con la máxima intensidad precisamente la luz de aquellas longitudes de onda que él emite cuando está muy caliente. Las rayas oscuras sobre el fondo del espectro continuo son rayas de absorción, que, en conjunto, forman un *espectro de absorción*.

9.4. Análisis espectral

Los espectros de rayas desempeñan un importante papel especial, porque su carácter está ligado directamente con la estructura del átomo. Estos espectros los crean átomos que no sufren influencias externas. Por eso, al conocer los espectros de rayas, damos el primer paso para el estudio de la estructura atómica Observando estos espectros los científicos tuvieron la posibilidad de "mirar" el interior del átomo. Aquí la óptica entra en contacto directo con la física atómica.

La propiedad principal de los espectros de rayas consiste en que las longitudes de onda (o las frecuencias) del espectro de rayas de una sustancia cualquiera dependen únicamente de las propiedades de los átomos de esta substancia, y no dependen en absoluto del procedimiento por el cual se excita la

luminosidad de los átomos. Los átomos de cada elemento químico dan un espectro que no se parece a los espectros de todos los demás elementos: son capaces de irradiar un conjunto rigurosamente determinado de longitudes de onda.

En esto se basa el *análisis espectral*, es decir, el método para determinar la composición química de una sustancia por su espectro. Algo así como las huellas dactilares de las personas, individualmente inconfundibles, vienen a ser los espectros de rayas. El carácter único de los surcos cutáneos de las falanges terminales de los dedos ayudan con frecuencia a detener un delincuente. Del mismo modo, la individualidad de los espectros da la posibilidad de determinar la composición química de un cuerpo. Con el análisis espectral se puede descubrir un elemento dado en la composición de una sustancia compuesta incluso si la masa de dicho elemento no supera 10^{-10} g. La sensibilidad de este método es grandísima.

El análisis cuantitativo de la composición de una sustancia por medio de su espectro es difícil, ya que el brillo de las rayas espectrales depende no sólo de la masa de la sustancia, sino también del procedimiento que se emplea para excitar la luminosidad. Así, a temperaturas no muy altas, muchas rayas espectrales no se manifiestan en general. No obstante, si se cumplen las condiciones establecidas en las normas para excitar la luminosidad, también es posible el análisis espectral cuantitativo.

En la actualidad ya han sido determinados los espectros de todos los átomos y existen tablas de ellos. Por medio del análisis espectral se han descubierto muchos elementos nuevos, como el rubidio, el cesio y otros. Los elementos han recibido, a menudo, nombres derivados del color de las rayas más intensas de su espectro. El rubidio, por ejemplo, da rayas rojo-oscuras, de color rubí. La palabra *cesio* (del latín *caesius*) significa azul celeste. Ese es el color de las rayas fundamentales del espectro del cesio.

Precisamente por medio del análisis espectral se ha sabido la composición química del Sol y de las estrellas. En estos casos los otros métodos de análisis son inaplicables. Las estrellas resulta que están formadas por los mismos elementos químicos que hay en la Tierra. Es curioso que el helio fue descubierto antes en el Sol que en la atmósfera de la Tierra. El nombre de este elemento recuerda la historia de su descubrimiento: la palabra *helio* (del griego *helios*) significa sol.

En virtud de su relativa sencillez y universalidad, el análisis espectral es el método fundamental de control de la composición de los materiales en la metalurgia, construcción de maquinaria e industria atómica. Por medio del análisis espectral se determina la composición química de las menas y minerales. La composición de las mezclas complejas, principalmente orgánicas, se analiza por sus espectros moleculares.

El análisis espectral se puede hacer no sólo ateniéndose a los espectros de emisión, sino también a los espectros de absorción. Precisamente las rayas de absorción del espectro del Sol y de las estrellas son las que permiten estudiar la composición química de estos cuerpos celestes. La brillante superficie luminosa del Sol—fotosfera—da un espectro continuo. La atmósfera solar absorbe selectivamente la luz de la fotosfera, lo que hace que aparezcan las rayas de absorción sobre el fondo del espectro continuo de la fotosfera.

Pero la atmósfera misma del Sol también emite luz. Durante los eclipses de Sol, cuando el disco solar está tapado por la Luna, se produce la "inversión" de las rayas del espectro. En vez de las rayas de absorción, en el espectro solar se destacan las rayas de emisión

9.5. Radiación infrarroja y ultravioleta

RADIACIÓN INFRARROJA. Volvamos al experimento para investigar cómo está distribuida la energía en el espectro del arco voltaico, descrito en el § 9.2. Cuando la lámina ennegrecida—elemento sensible del termómetro—se desplaza hacia el extremo rojo del espectro se nota que la temperatura aumenta. Si la lámina se corre más allá del extremo rojo del espectro, donde el ojo no ve luz, el calentamiento de la lámina resulta ser todavía mayor. Las ondas electromagnéticas que producen este calentamiento reciben el nombre de *infrarrojas*. Estas ondas las emite todo cuerpo caliente incluso si no está incandescente. Por ejemplo, un horno caliente o una batería de calefacción emiten ondas infrarrojas, las cuales calientan sensiblemente los cuerpos que las rodean. Por eso las ondas infrarrojas se suelen llamar también *térmicas*.

Las ondas infrarrojas, imperceptibles para el ojo humano, tienen longitudes mayores que la de la onda de luz roja. El máximo de la energía de radiación del arco voltaico y de las lámparas de incandescencia corresponde a los rayos infrarrojos.

La radiación infrarroja se utiliza para secar pinturas, hortalizas, frutas, etc. Hay aparatos con los cuales la imagen infrarroja de un objeto, invisible, se hace visible. Se construyen gemelos y visores ópticos que permiten ver en la oscuridad.

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. Más allá del extremo violeta del espectro el termómetro eléctrico también pone de manifiesto una elevación de la temperatura, aunque no de mucha importancia. Por consiguiente, existen ondas electromagnéticas de menor longitud que las de la luz violeta. Estas ondas se llaman *ultravioletas*.

La radiación ultravioleta se puede descubrir empleando una pantalla recubierta de sustancia luminiscente. La pantalla empieza a emitir luz en aquella parte a la cual llegan los rayos que se encuentran más allá de la zona violeta del espectro.

Los rayos ultravioletas se caracterizan por ser químicamente muy activos. La emulsión fotográfica es muy sensible a la radiación ultravioleta. De esto es fácil cerciorarse si en un local oscuro se proyecta el espectro sobre un papel fotográfico. Una vez revelado, el ennegrecimiento del papel es mayor en la parte que se expuso más allá del extremo violeta del espectro que en la región visible de este.

Los rayos ultravioletas no originan imágenes visuales, son invisibles. Pero su acción sobre la retina del ojo y sobre la piel es grande y destructora. Las capas superiores de la atmósfera absorben insuficientemente la radiación ultravioleta del Sol. Por eso en las montañas altas no se puede estar sin gafas oscuras ni permanecer desnudos durante mucho tiempo. El vidrio absorbe intensamente los rayos ultravioletas. Ésta es la razón por la cual los vidrios de

las gafas, transparentes para el espectro visible, protegen los ojos contra la radiación ultravioleta

Sin embargo, los rayos ultravioletas en pequeñas dosis producen efectos terapéuticos. Los baños de Sol prudentes son beneficiosos sobre todo para los jóvenes; los rayos ultravioletas contribuyen al crecimiento y fortalecen el organismo Además de su acción directa sobre los tejidos de la piel (formación del pigmento protector y de la vitamina D_2), los rayos ultravioletas influyen en el sistema nervioso central, estimulando una serie de funciones vitales en el organismo.

Los rayos ultravioletas ejercen también acción bactericida. Destruyen bacterias patógenas y, para este fin, se utilizan en medicina

9.6. Rayos *X*

Quizá no todos hayan oído hablar de rayos infrarrojos y ultravioletas, pero nadie ignora que existen los *rayos X*. Estos admirables rayos pasan a través de cuerpos que son opacos para la luz ordinaria. El grado de absorción de estos rayos es proporcional a la densidad de la sustancia. Por eso con los rayos *X* se pueden obtener fotografías (radiografías) de los órganos internos del cuerpo humano. En estas radiografías se distinguen bien los huesos del esqueleto (fig 217) y se localizan diversas degeneraciones de los tejidos blandos.

En la URSS todos los ciudadanos se someten una vez al año a exploración fluoroscópica. Por medio de los rayos X se hacen radiografías del tórax que permiten prevenir posibles enfermedades antes de que el individuo comience a sentir sus síntomas.

DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X Los rayos *X* fueron descubiertos en 1895 por el físico alemán Wilhelm Konrad ROENTGEN. Era éste un hombre capaz de observar y notar lo nuevo allí donde muchos científicos no veían nada de particular. Este don le ayudó a hacer el magnífico descubrimiento.

A finales del siglo XIX atrajo la atención general de los físicos la descarga eléctrica en gas a poca presión. En estas condiciones en el tubo de descarga se creaban flujos de electrones muy rápidos, que en aquel entonces recibieron el nombre de rayos catódicos Su naturaleza aún no se conocía de un modo fidedigno. Sólo se sabía que se originaban en el cátodo del tubo.

Roentgen también se dedicó a investigar los rayos catódicos y pronto descubrió que una placa fotográfica que estaba cerca del tubo de descarga se velaba incluso envuelta en un papel negro. Más tarde consiguió observar otro fenómeno que le extrañó mucho. Una pantalla de papel impregnada ligeramente en solución de platinocianuro de bario empezaba a emitir luz cuando con ella se envolvía el tubo de descarga. Y si Roentgen interponía su mano entre el tubo y la pantalla, se veían en ésta las sombras oscuras de los huesos sobre el fondo más claro del contorno de la mano.

El científico comprendió que en el tubo de descarga se originaba una radiación muy penetrante desconocida hasta entonces. El mismo le dio el nombre de rayos *X*. Después fue denominada también con el término de "rayos Roentgen".

Wilhelm Roentgen (1845–1923), eminente físico alemán. En 1895 descubrió la radiación electromagnética de onda corta que se conoce con el nombre de rayos X o rayos Roentgen. Este descubrimiento ejerció enorme influencia en todo el desarrollo ulterior de la física y, en particular, condujo al descubrimiento de la radiactividad. El primer premio Nobel de física fue concedido a W. Roentgen. Contribuyó a la rápida aplicación práctica de su invento en medicina y a su propagación. La estructura del primer tubo de rayos X, que él construyó, se ha conservado en rasgos generales hasta hoy

Roentgen observo que la nueva radiacion se manifestaba en el punto en que los rayos catódicos (flujos de electrones rapidos) chocaban con la pared de vidrio del tubo. En este sitio el vidrio emitia luz verdosa. Experimentos posteriores demostraron que los rayos *X* se producen al ser decelerados los electrones rápidos por cualquier obstáculo, en particular por electrodos metálicos.

PROPIEDADES DE LOS RAYOS *X*. Los rayos descubiertos por Roentgen actuaban sobre la placa fotográfica y producían la ionización del aire pero no se reflejaban apreciablemente ni se refractaban en ninguna sustancia. El campo electromagnético no ejercía influencia alguna sobre la dirección en que se propagaban

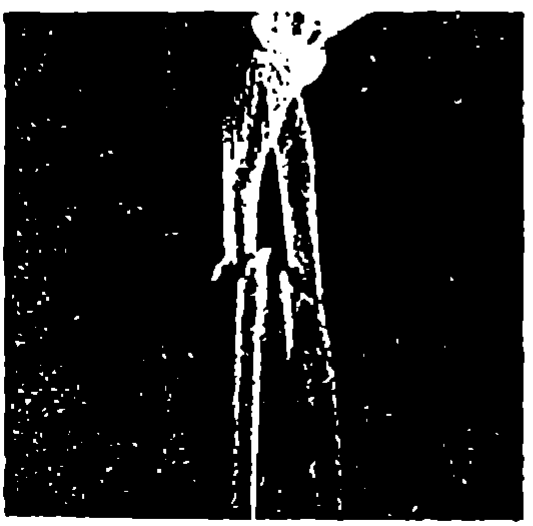


Fig. 217

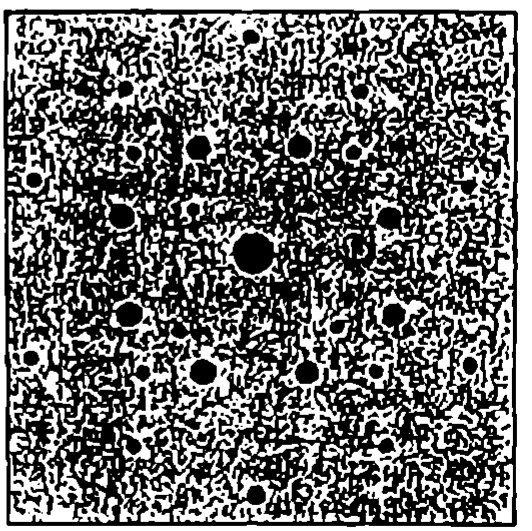


Fig. 218

Se supuso de inmediato que los rayos *X* son ondas electromagnéticas que se originan cuando los electrones son decelerados bruscamente. A diferencia de los rayos luminosos de la parte visible del espectro y de los rayos ultravioletas, los rayos *X* tienen una longitud de onda mucho menor Esta longitud es tanto menor cuanto más energía tienen los electrones que chocan con el obstáculo. La gran penetrabilidad de los rayos *X* y sus demás peculiaridades se suponían debidas precisamente a la pequeñez de su longitud de onda Pero esta hipótesis requería demostraciones, las cuales fueron aportadas 15 años después del descubrimiento de los rayos

DIFRACCIÓN DE LOS RAYOS *X*. Si los rayos *X* son ondas electromagnéticas, deben difractarse, puesto que el fenómeno de la difracción es característico para todos los tipos de ondas. Los rayos *X* se hicieron pasar por rendijas muy estrechas practicadas en láminas de plomo, pero no pudo observarse nada semejante a la difracción. Entonces el físico alemán Max LAUE supuso que la longitud de onda de estos rayos era demasiado pequeña para que su difracción en obstáculos creados artificialmente pudiera ser descubierta, ya que es imposible hacer rendijas de 10^{-8} cm de anchura, que es la dimensión del propio átomo ¿Y si los rayos *X* tienen, aproximadamente, esa misma longitud de onda? Quedaba una sola posibilidad de difractarlos, utilizar como redes de difracción los cristales. Éstos son estructuras ordenadas en las cuales las distancias entre los distintos átomos son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de éstos, es decir, de 10^{-8} cm. Un cristal, con su estructura periódica, es un dispositivo natural que inevitablemente debe producir la difracción apreciable de las ondas, si la longitud de éstas se aproxima a las dimensiones de los átomos.

Y he aquí que un estrecho haz de rayos *X* fue dirigido sobre un cristal, detrás del cual se había colocado una placa fotográfica El resultado que se obtuvo coincidía totalmente con las esperanzas más optimistas. Además de la gran mancha central que producían los rayos que se propagaban rectilíneamente, aparecían pequeñas manchitas regularmente dispuestas alrededor de aquélla (fig 218) La presencia de estas manchitas sólo podía explicarse por la difracción de los rayos *X* en la estructura ordenada del cristal.

El estudio de la figura de difracción dio la posibilidad de medir la longitud de onda de los rayos *X*, la cual resultó ser menor que la de los rayos ultravioletas y, por su orden de magnitud, igual a las dimensiones de los átomos (10^{-8} cm)

APLICACIÓN DE LOS RAYOS *X*. Los rayos *X* han encontrado muchas y muy importantes aplicaciones prácticas.

En medicina se utilizan para diagnosticar correctamente las enfermedades.

Su empleo en la investigación científica es muy extenso. Por la figura de difracción, que se obtiene al pasar estos rayos a través de los cristales, se consigue establecer el orden en que están colocados los átomos en el espacio, es decir, la estructura de los cristales. Hacer esto con las sustancias cristalinas inorgánicas no ofrece dificultad. Pero por medio del análisis estructural de rayos *X* se consigue descifrar también la estructura de los compuestos orgánicos más complejos, incluso de las proteínas En particular se ha podido determinar la estructura molecular de la hemoglobina, que consta de decenas de millares de átomos.

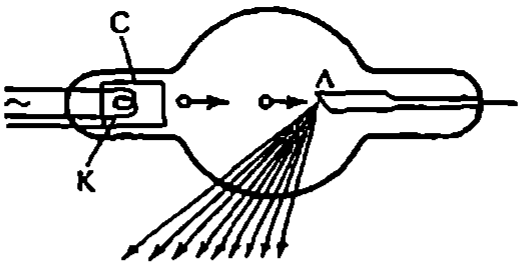


Fig. 219

Estos resultados han sido posibles gracias a que la longitud de onda de los rayos X es muy pequeña. Precisamente por eso se pudo "ver" la estructura molecular. Ver, claro está, no en el sentido directo de la palabra, se trata en obtener la figura de difracción, por medio de la cual, después de hacer no pocos esfuerzos para descifrarla, se puede reconstruir el carácter de la disposición espacial de los átomos.

Entre otras aplicaciones de los rayos X conviene destacar la *defectoscopia*, es decir, el método para detectar rechupes en las piezas de fundición, grietas en los raíles, defectos en las costuras soldadas, etc. La defectoscopia de rayos X se basa en la variación que experimenta la absorción de los rayos X por las piezas cuando en ellas hay cavidades o inclusiones extrañas.

ESTRUCTURA DEL TUBO DE RAYOS X. Para obtener los rayos X se han concebido aparatos muy perfectos llamados *tubos de rayos X*. Estos tubos superan en mucho a los construidos por Roentgen.

En la fig. 219 se muestra esquemáticamente la estructura de un tubo electrónico de rayos X. El cátodo K es una espiral de volframio que emite electrones en virtud de la emisión termoelectrónica. El cilindro C enfoca el flujo de electrones que van a chocar con el electrodo metálico (ánodo) A. Al ocurrir esto se generan los rayos X. La tensión entre el ánodo y el cátodo alcanza varias decenas de kilovoltios. En el tubo se crea un vacío profundo, la presión del gas en él es de 10^{-5} a 10^{-7} mm Hg.

9.7. Escala de las radiaciones electromagnéticas

Sabemos que la longitud de las ondas electromagnéticas puede ser muy diversa: desde valores del orden de 10^3 m (ondas hertzianas) hasta 10^{-8} cm (rayos X). La luz visible constituye una parte insignificante del amplio espectro de las ondas electromagnéticas. Pero precisamente al estudiar esta pequeña parte del espectro fueron descubiertas otras radiaciones con propiedades extraordinarias.

En las guardas de este libro puede verse la escala completa de las ondas electromagnéticas, con indicación de las longitudes de onda y de las frecuencias de las distintas radiaciones, así como de los aparatos con los cuales se obtienen las ondas electromagnéticas de las distintas gamas de frecuencias. Se distinguen *las radiaciones de baja frecuencia, las ondas hertzianas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos* γ. Todas estas radiaciones, excepto los rayos γ, se han dado ya a conocer. La radiación de onda más corta es la de rayos γ, que son emitidos por los núcleos atómicos.

Entre las distintas radiaciones en principio no existe una diferencia esencial

Todas ellas son ondas electromagnéticas generadas por partículas cargadas que se mueven con aceleración. Las ondas electromagnéticas se manifiestan, al fin de cuentas, por su acción sobre las partículas cargadas. En el vacío toda radiación electromagnética, cualquiera que sea su longitud de onda, se propaga con la velocidad de 300 000 km/s. Los límites entre las distintas zonas de la escala de radiaciones son puramente convencionales.

Las radiaciones de distinta longitud de onda se diferencian entre sí por el procedimiento de obtención (emisión por una antena, radiación térmica, radiación por deceleración de los electrones rápidos, etc.) y por los métodos para detectarlas.

De los procedimientos de obtención y detección de las ondas hertzianas se trató en el capítulo 5; de las ondas electromagnéticas de la gama óptica (infrarrojas, visibles y ultravioletas) y de los rayos X, se ha hablado brevemente en este capítulo. A continuación vamos a referirnos a los rayos γ.

A medida que disminuye la longitud de onda las diferencias cuantitativas de dicha longitud conducen a diferencias cualitativas importantes.

Las radiaciones de distinta longitud de onda se diferencian mucho entre sí por la capacidad de la sustancia para absorberlas. Las radiaciones de onda corta (los rayos X y, sobre todo, los rayos γ) son poco absorbidas. Las sustancias opacas para las ondas de la gama visible son transparentes para estas radiaciones. El índice de reflexión de las ondas electromagnéticas también depende de la longitud de onda. Pero la diferencia principal entre las radiaciones de onda larga y las de onda corta consiste en que la radiación de onda corta revela las propiedades de las partículas. De esto vamos a tratar en el capítulo siguiente.

¿?

1. Enumere las fuentes de luz que conozca.
2. ¿Es continuo el espectro de la luz que emite una lámpara de incandescencia?
3. Describa cómo debe estar estructurado un aparato espectral en el cual, en vez de un prisma, se utilice una red de difracción.
4. ¿Qué operaciones hay que hacer con un corpúsculo de sustancia para conocer su composición química, aplicando el análisis espectral?
5. ¿Por qué la luz solar que pasa a través del vidrio de una ventana no broncea la piel?
6. ¿Qué se determina por las rayas de absorción del espectro solar: la composición de la atmósfera del Sol o la de sus capas profundas?
7. ¿Por qué procedimiento se detectan las ondas hertzianas, las radiaciones de la gama óptica y los rayos X?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 9

La luz la emiten las partículas cargadas, es decir, los electrones, que se mueven en los átomos. Para que un átomo pueda radiar tiene que recibir energía del exterior. Si los átomos reciben la energía durante los choques en el proceso del movimiento térmico, se dice que la radiación es térmica. La causa de la electroluminiscencia y de la catodoluminiscencia es la excitación de los átomos por los electrones acelerados en un campo eléctrico. Los átomos pueden excitarse y emitir luz durante algunas reacciones químicas.

En esto consiste la quimioluminiscencia. Finalmente, una serie de cuerpos comienzan a emitir luz cuando sobre ellos actúa una radiación. Ésta es la fotoluminiscencia.

Las fuentes de luz más difundidas son las térmicas: el Sol, las lámparas eléctricas de incandescencia, la llama, etc.

Una característica muy importante de una radiación es la distribución de su energía entre las frecuencias o las longitudes de onda. Los espectros de emisión se investigan por medio de los aparatos espectrales. El elemento esencial de un aparato espectral es un prisma o una red de difracción.

La radiación que emiten los sólidos, los líquidos y el plasma de alta temperatura tiene espectro continuo. En el espectro continuo están representadas con distinta intensidad todas las longitudes de onda.

En cambio, la radiación que emite la sustancia en estado atómico gaseoso tiene espectro de rayas. Las longitudes de las ondas del espectro de rayas dependen únicamente de las propiedades de los átomos de la sustancia y no de los procedimientos de excitación de los átomos. En este hecho se funda el análisis espectral.

Los espectros de emisión de las moléculas constan de franjas anchas, separadas por intervalos oscuros. Este tipo de espectro se llama espectro de bandas.

La absorción de la luz por la sustancia depende de la longitud de onda. La luz que más intensamente absorbe una sustancia es la de aquellas longitudes de onda en las cuales ella misma emite con intensidad la energía cuando se encuentra en estado muy caliente. Por las rayas de absorción se determina la composición química del Sol y de las estrellas.

La luz visible son ondas electromagnéticas de longitud desde $4 \cdot 10^{-7}$ hasta $8 \cdot 10^{-7}$ m. Las radiaciones cuyas longitudes de onda son mayores que la de la luz roja ($8 \cdot 10^{-7}$ m) se llaman infrarrojas. Rayos infrarrojos emiten todos los cuerpos calientes.

Las ondas electromagnéticas cuyas longitudes son menores que $4 \cdot 10^{-7}$ m se llaman ultravioletas. Los rayos ultravioletas se distinguen por su gran actividad química.

Aún menor es la longitud de onda de los rayos X. La longitud de onda de estos rayos es del orden de las dimensiones de los átomos. Los rayos X se producen cuando los electrones que han pasado por una tensión aceleradora de varios kilovoltios se decelera n bruscamente. Estos rayos se utilizan en medicina (diagnóstica de rayos X), en la técnica (defectoscopia de rayos X) y en la investigación científica.

La escala de las ondas electromagnéticas se extiende desde las ondas hertzianas largas ($\lambda > 1$ km) hasta los rayos gamma ($\lambda < 10^{-10}$ m). Las ondas electromagnéticas de distinta longitud se dividen convencionalmente en gamas atendiéndose a diversos criterios (procedimiento de obtención, método de detección, carácter de su interacción con la sustancia). Las diferencias cuantitativas de las longitudes de onda conduce a diferencias cualitativas importantes. La radiación de onda corta pone de manifiesto las propiedades de las partículas.

Física cuántica

Introducción

(Surgimiento de la teoría cuántica)

La gran revolución en la física coincidió con el comienzo del siglo XX. Los intentos de explicar las leyes de la distribición de la energía en los espectros de emisión térmica (radiación electromagnética del cuerpo caliente) que es observaban en los experimentos resultaron infructuosos. Las leyes del electromagnetismo de Maxwell, tantas veces comprobadas, se "plantaron" inesperadamente cuando se quiso aplicarlas al problema de la emisión de ondas electromagnéticas cortas por la sustancia. Esto era tanto más sorprendente por cuanto estas leyes definen muy bien la emisión de las ondas hertzianas por una antena y, en su tiempo, la existencia misma de las ondas electromagnéticas fue predicha fundándose en estas leyes.

La electrodinámica de Maxwell conducía en este caso a una conclusión sin sentido, según la cual un cuerpo caliente, perdiendo continuamente energía a causa de la radiación de ondas electromagnéticas, debería enfriarse hasta la temperatura de cero absoluto De acuerdo con la teoría clásica, el equilibrio térmico entre la sustancia y la radiación es imposible. Pero la experiencia diaria demuestra que, en realidad, no ocurre nada de esto. Un cuerpo caliente no gasta toda su energía en radiar ondas electromagnéticas.

Buscando una salida a esta contradicción entre la teoría y la experiencia, el físico alemán Max PLANCK supuso que los átomos emiten la energía electromagnética en porciones discontinuas, *cuantos*. La energía E de cada porción es directamente proporcional a la frecuencia ν de la radiación.

$$E = h\nu.$$

El coeficiente de proporcionalidad h recibe el nombre de *constante de Planck*.

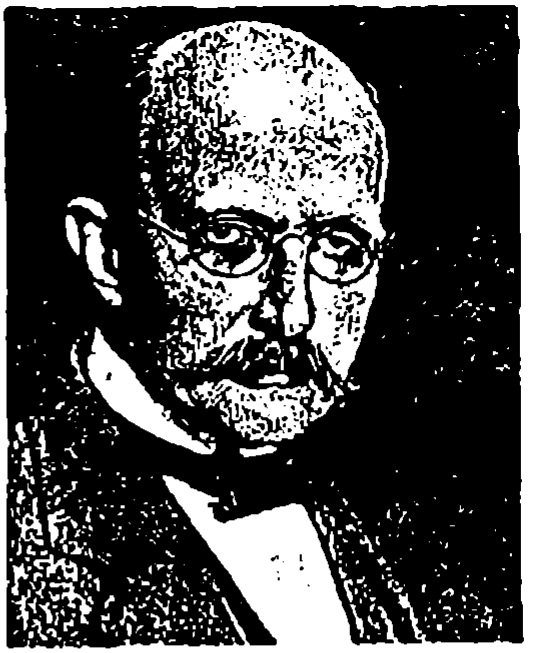
La suposición de Planck significaba de hecho que las leyes de la física clásica son inaplicables a los fenómenos del micromundo.

La teoría de la radiación térmica construida por Planck concordaba perfectamente con la experiencia Por la distribución de la energía entre las frecuencias, conocida experimentalmente, se determinó el valor de la constante de Planck. Dicho valor resultó ser muy pequeño

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}.$$

En el párrafo siguiente se estudiará otro fenómeno físico con ayuda del cual también se puede determinar la constante de Planck, pero por un procedimiento más sencillo

Max Planck (1858–1947), gran físico teórico alemán, fundador de la teoría cuántica, o sea, de la teoría moderna del movimiento, las interacciones y las transmutaciones de las partículas microscópicas. En 1900, en un trabajo dedicado a la radiación térmica en equilibrio, introdujo por primera vez la suposición de que la energía de un oscilador (sistema que efectúa oscilaciones armónicas) toma valores discretos proporcionales a la frecuencia de las oscilaciones ν. El coeficiente de proporcionalidad h entre la energía y la frecuencia recibió el nombre de constante de Planck. La energía electromagnética es emitida por el oscilador en porciones $h\nu$ separadas. También hizo una gran aportación al desarrollo de la termodinámica.



Así, pues, Planck indicó la salida de las dificultades con que había tropezado la teoría. Pero este éxito fue logrado a costa de renunciar a la aplicación de las leyes de la física clásica a los sistemas microscópicos y a la radiación

10 CUANTOS DE LUZ. ACCIÓN DE LA LUZ

10.1. Efecto fotoeléctrico

En el desarrollo de las ideas acerca de la naturaleza de la luz se dio un gran paso al estudiar un fenómeno curioso, descubierto por H. Hertz y cuidadosamente investigado por el eminente físico ruso Alexandr Grigórievich STOLIÉTOV. Este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto fotoeléctrico*

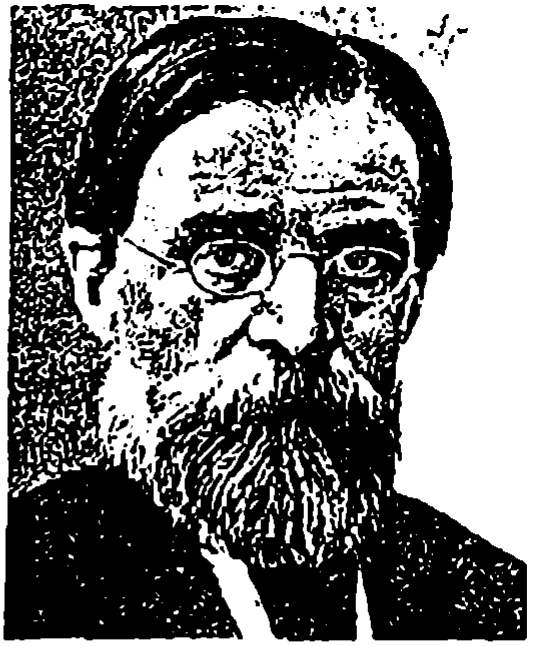
Se llama efecto fotoeléctrico el desprendimiento (arranque) de electrones de una sustancia por la acción de la luz.

Para observar el efecto fotoeléctrico se puede utilizar una plaquita de zinc unida a un electroscopio (fig. 220). Si la plaquita se carga positivamente, su iluminación, por ejemplo, con un arco voltaico, no influye en la rapidez con que se descarga el electroscopio. Pero si la plaquita se carga negativamente, el haz luminoso del arco descarga el electroscopio muy rápidamente

Esto solo tiene una explicación. La luz arranca electrones de la superficie de la plaquita. Si ésta tiene carga negativa, los electrones son repelidos y el electroscopio se descarga. Pero si la carga de la plaquita es positiva, los electrones arrancados por la luz son atraídos por la placa y vuelven a ella. Por eso la carga del electroscopio no varía.

Cuando en la trayectoria del flujo luminoso se interpone un vidrio ordinario, la plaquita cargada negativamente ya no pierde electrones por muy intenso que sea dicho flujo. Como se sabe que el vidrio absorbe los rayos ultravioletas, de este experimento se deduce que es precisamente la parte ultravioleta del espectro la que produce el efecto fotoeléctrico. Este hecho, simple de por sí, no se puede explicar basándose en la teoría ondulatoria de la luz. Es incomprensible por qué las ondas luminosas de pequeña frecuencia no pueden arrancar electrones incluso si la amplitud de la onda es grande y, por consiguiente, es grande también la fuerza que actúa sobre los electrones.

LEYES DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO Para tener una idea más completa del efecto fotoeléctrico es necesario esclarecer de qué depende el número de electrones arrancados por la luz (fotoelectrones) de la superficie de la sustancia y qué determina su velocidad o energía cinética. Con este fin se realizaron investigaciones experimentales que consistieron en lo siguiente. En una ampolla de vidrio, de la que se extrae el aire, hay dos electrodos (fig. 221) A través de una "ventana" de cuarzo, transparente no sólo para la luz visible, sino también para la radiación ultravioleta, penetra en la ampolla e incide sobre uno de los electrodos un haz de luz A los electrodos se aplica una tensión, que puede variarse con un potenciómetro y medirse con un voltímetro. Al electrodo iluminado se conecta el polo negativo de la batería Bajo la acción de la luz este electrodo emite electrones que, al moverse en el campo eléctrico, originan una



Alexandr Grigórievich Stoliétov (1839–1896), eminente físico ruso Conocido en todo el mundo por su investigación del efecto fotoeléctrico Demostró la posibilidad de utilizar dicho efecto en la practica.
En su tesis doctoral "Estudio de la función imanación del hierro dulce" elaboró el método de investigación de los materiales ferromagnéticos y estableció la forma de la curva de imanación. Este trabajo se utilizó mucho en la práctica al construir máquinas eléctricas.
Stoliétov hizo grandes esfuerzos en pro del desarrollo de la física en Rusia. Por iniciativa suya se creó el Instituto de Física adjunto a la Universidad de Moscú

corriente eléctrica. Cuando las tensiones son pequeñas no todos los electrones arrancados por la luz llegan al otro electrodo Si, manteniendo constante el flujo luminoso, aumentamos la diferencia de potencial entre los electrodos la intensidad de la corriente crece. Para cierto valor de la tensión la intensidad de la corriente alcanza su valor máximo, después de lo cual cesa su crecimiento (fig 222). El valor máximo de la intensidad de la corriente I_s recibe el nombre de *corriente de saturación*. Esta corriente viene determinada por el número de electrones que emite por segundo el electrodo iluminado.

Variando en este experimento el flujo luminoso se consigue establecer que el número de electrones arrancados por la luz de la superficie del metal en 1 s es directamente proporcional a la energía de la onda luminosa absorbida durante ese tiempo. En esto no hay nada inesperado: cuanto mayor es la energía del haz luminoso tanto más eficaz es su acción.

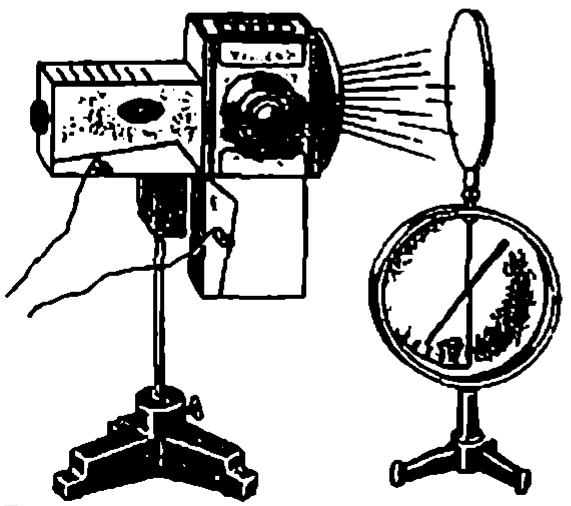


Fig 220

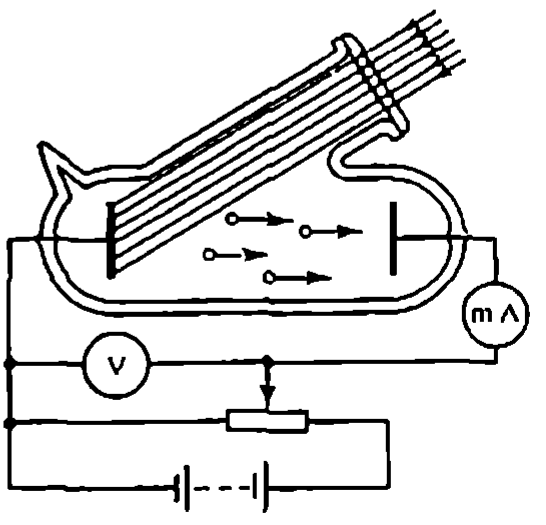


Fig 221

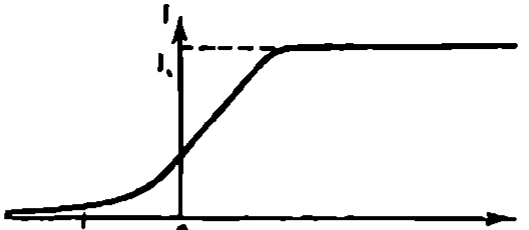


Fig. 222

Detengámonos ahora en la medición de la energía cinética (o de la velocidad) de los electrones. En la gráfica que reproduce la fig. 222 se ve que la intensidad de la corriente fotoeléctrica es distinta de cero incluso cuando la tensión es nula. Esto significa que una parte de los electrones arrancados por la luz llegan al electrodo derecho (véase la fig. 221) en ausencia de tensión. Si se invierte la polaridad de la batería, la intensidad de la corriente disminuye y, con cierto valor U_r de la polaridad invertida, se anula. Se debe esto a que el campo eléctrico decelera los electrones arrancados hasta detenerlos totalmente y, luego, hace que retornen al electrodo.

La *tensión retardadora* U_r depende de la energía cinética máxima de los electrones arrancados por la luz. Midiendo la tensión retardadora y aplicando el teorema de la energía cinética (véase el libro "Física 2" de Ed. MIR), se puede hallar el valor máximo de la energía cinética de los electrones.

$$\frac{mv^2}{2} = eU_r.$$

Si varía la intensidad de la luz (es decir, la energía que incide sobre el electrodo en la unidad de tiempo), la tensión retardadora, como muestran los experimentos hechos, no varía. Esto significa que no varía la energía cinética de los electrones. Desde el punto de vista de la energía ondulatoria este hecho es incomprensible, ya que cuanto mayor sea la intensidad de la luz, tanto mayores serán las fuerzas que actúan sobre los electrones por parte del campo electromagnético de la onda luminosa y, al parecer, tanto más energía debería transmitirse a los electrones.

Los experimentos pusieron de manifiesto que la energía cinética de los electrones arrancados por la luz sólo depende de la frecuencia de ésta. La energía cinética máxima de los fotoelectrones crece linealmente con la frecuencia de la luz y no depende de la intensidad de ésta. Si la frecuencia de la luz es menor que cierta frecuencia mínima $\nu_{mín}$, magnitud ésta del todo determinada para cada sustancia dada, el efecto fotoeléctrico no se produce.

10.2. Teoría del efecto fotoeléctrico

Todos los intentos de explicar el fenómeno del efecto fotoeléctrico basándose en las leyes de la electrodinámica de Maxwell, según la cual la luz es una onda electromagnética distribuida continuamente en el espacio, resultaron infructuosos. Era imposible comprender por qué la energía de los fotoelectrones solo está determinada por

la frecuencia de la luz y por qué la luz arranca electrones únicamente cuando su longitud de onda es pequeña.

La explicación del efecto fotoeléctrico fue dada en 1905 por Albert Einstein, que desarrolló la idea de Planck sobre la emisión discontinua de la luz. En las leyes empíricas del efecto fotoeléctrico vio Einstein la confirmación más convincente de que la luz tiene estructura discontinua y es absorbida en porciones separadas (discretas). La energía E de cada porción de radiación, en total acuerdo con la hipótesis de Planck, es proporcional a la frecuencia:

$$E = h\nu, \tag{10.1}$$

donde h es la constante de Planck.

De que la luz sea emitida, como demostró Planck, en porciones no se infiere aún que la estructura de la propia luz sea discontinua, como del hecho de que la lluvia caiga en forma de gotas no se sigue que el agua de los arroyos esté formada por partes o gotas indivisibles. Solamente el efecto fotoeléctrico puso de manifiesto que la luz tiene efectivamente estructura discontinua: la porción de energía luminosa radiada $E = h\nu$ conserva en lo sucesivo su individualidad. Sólo pueden ser absorbidas porciones enteras. La energía de cada porción de radiación se determina por la fórmula (10.1).

La energía cinética del fotoelectrón se puede hallar aplicando la ley de conservación de la energía. La energía de la porción de luz $h\nu$ se gasta en realizar el *trabajo de extracción o salida* A, es decir, el trabajo necesario para arrancar el electrón del metal, y en comunicarle energía cinética. Por lo tanto,

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \tag{10.2}$$

Esta ecuación explica los hechos principales concernientes al efecto fotoeléctrico. La intensidad de la luz, según Einstein, es proporcional al número de cuantos (porciones) de energía que hay en el haz luminoso y, por consiguiente, determina el número de electrones que arranca del metal. La velocidad de los electrones, de acuerdo con (10.2), viene determinada únicamente por la frecuencia de la luz y por el trabajo de extracción, que depende, a su vez, del tipo de metal y del estado de su superficie. De la intensidad de la luz no depende.

En cada sustancia se observa el efecto fotoeléctrico si la frecuencia ν de la luz es mayor que un valor mínimo ν_{min}, ya que para arrancar un electrón del metal, incluso sin comunicarle energía cinética, es necesario realizar el trabajo de extracción A. Por consiguiente, la energía del cuanto de luz debe ser mayor que dicho trabajo:

$$h\nu > A$$

La frecuencia límite (mínima) ν_{min} recibe el nombre de *frecuencia umbral* o *umbral rojo* fotoeléctrico. Esta frecuencia se expresa así:

$$\nu_{min} = \frac{A}{h} \tag{10.3}$$

El trabajo de extracción A depende del tipo de metal. Por eso la frecuencia umbral $\nu_{mín}$ (umbral rojo) es distinta para sustancias diferentes.

Para el zinc la frecuencia umbral es la correspondiente a la longitud de onda umbral $\lambda_{máx} = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ cm (radiación ultravioleta). Esto explica el resultado del experimento de interrupción del efecto fotoeléctrico por medio de la lámina de vidrio, que absorbe los rayos ultravioletas.

El trabajo de extracción en el aluminio y en el hierro es mayor que en el zinc. Por eso en el experimento descrito en el § 10.1 se utilizó una plaquita de zinc. En los metales alcalinos, por el contrario, el trabajo de extracción es menor y la longitud de onda umbral $\lambda_{máx}$ es mayor. Así, para el sodio $\lambda_{máx} = 6{,}8 \times 10^{-5}$ cm.

Aplicando la ecuación de Einstein (10.2) se puede hallar la constante de Planck h. Para esto hay que determinar experimentalmente la frecuencia ν de la luz y el trabajo de extracción A y medir la energía cinética de los fotoelectrones. Este tipo de medidas y cálculos dan: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J s. Exactamente este mismo valor fue hallado por Planck cuando estudiaba la teoría de otro fenómeno muy distinto, la radiación térmica. La coincidencia de los valores de la constante de Planck obtenidos por métodos diferentes confirma que la hipótesis acerca del carácter discontinuo de la emisión y la absorción de la luz por la sustancia es correcta.

10.3. Fotones

La luz, al ser emitida y absorbida, se comporta como un flujo de partículas cuya energía $E = h\nu$ depende de la frecuencia. La porción de luz inesperadamente resultó ser muy parecida a lo que se admite denominar partícula. Las propiedades de la luz que se manifiestan durante la emisión y la absorción se llaman corpusculares. La propia partícula de luz recibió el nombre de *fotón* o *cuanto de luz*.

El fotón, como las partículas, tiene una determinada porción de energía $h\nu$. La energía del fotón se suele expresar no por medio de la frecuencia ν, sino por la frecuencia angular $\omega = 2\pi\nu$. En este caso, en vez del coeficiente de proporcionalidad h, se utiliza la magnitud $\hbar$ (que se lee "h cruzada" o "h de Dirac"),

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Entonces la energía del fotón se escribe así:

$$E = h\nu = \hbar\omega \tag{10.4}$$

De acuerdo con la teoría de la relatividad, la energía está siempre relacionada con la masa por la fórmula $E = mc^2$. Y como la energía del fotón es $h\nu$, su masa m se determina así:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \tag{10.5}$$

El fotón no tiene masa en reposo m_0, es decir, no existe en estado de reposo y al generarse adquiere inmediatamente la velocidad c. La masa definida por la fórmula (10.5) es la masa del fotón en movimiento. Conociendo la masa y la velocidad del fotón se puede hallar su impulso:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (10.6)$$

El impulso del fotón está dirigido en el sentido del rayo de luz.

Cuanto mayor sea la frecuencia, tanto mayores serán la energía y el impulso del fotón y tanto más claramente se manifestarán las propiedades corpusculares de la luz. Como la constante de Planck es muy pequeña, la energía de los fotones de la luz visible es insignificante. Los fotones correspondientes a la luz verde tienen una energía de $4 \cdot 10^{-19}$ J.

No obstante, en los magníficos experimentos de S. I. Vavílov se comprobó que el ojo humano, el más sensible de los "aparatos", es capaz de reaccionar ante diferencias de iluminación equivalentes a cuantos unitarios.

Así, pues, los científicos se vieron obligados a introducir el concepto de luz como un flujo de partículas. Esto puede parecer un retorno a la teoría corpuscular de Newton. Pero no debe olvidarse que la interferencia y la difracción de la luz nos dicen sin lugar a dudas que la luz tiene propiedades ondulatorias. La luz, pues, posee una *dualidad* de propiedades particular. Cuando la luz se propaga se manifiestan sus propiedades ondulatorias y cuando interacciona con la sustancia (emisión y absorción), se revelan sus propiedades corpusculares. Todo esto es, naturalmente, extraño y desacostumbrado. Figurárselo intuitivamente es imposible. No es posible imaginarse de un modo claro y completo los procesos del micromundo, porque son totalmente distintos de los fenómenos macroscópicos que el hombre viene observando durante millones de años y cuyas leyes fundamentales fueron enunciadas a finales del siglo XIX.

Con el tiempo la dualidad de propiedades se ha descubierto también en los electrones y en otras partículas elementales. El electrón, en particular, además de sus propiedades corpusculares, tiene propiedades ondulatorias. Se puede observar la difracción de los electrones.

Estas extraordinarias propiedades de los microobjetos se describen apoyándose en la *mecánica cuántica*, que es la teoría moderna del movimiento de las microparticulas. La mecánica de Newton es inaplicable en este caso. Pero el estudio de la mecánica cuántica supera el marco del curso de física de la enseñanza media.

10.4. Aplicaciones del efecto fotoeléctrico

El descubrimiento del efecto fotoeléctrico tuvo mucha importancia para poder profundizar el conocimiento de la naturaleza de la luz. Pero el mérito de la ciencia consiste no sólo en que esclarece la compleja y diversa estructura del mundo que nos rodea, sino también en que pone en nuestras manos los medios con los cuales se puede

perfeccionar la producción y mejorar las condiciones de vida material y cultural de la sociedad.

La aplicación del efecto fotoeléctrico hizo "hablar" al cinematógrafo y dio la posibilidad de transmitir las imágenes en movimiento (televisión). Utilizando aparatos fotoelectrónicos se ha conseguido crear máquinas herramientas que, sin la intervención del hombre, hacen piezas de acuerdo con los planos correspondientes. Aparatos basados en el efecto fotoeléctrico controlan las dimensiones de las piezas mejor que una persona cualquiera, conectan y desconectan a su debido tiempo los faros y el alumbrado público, etc.

Todo esto ha sido posible en virtud de haberse inventado las *células fotoeléctricas*, dispositivos en los cuales la energía de la luz regula la energía de una corriente eléctrica o se transforma en ella.

Una célula fotoeléctrica moderna consiste en una ampolla de vidrio cuya superficie interna está recubierta, en parte, por una capa delgada de metal, en el cual es pequeño el trabajo de extracción (fig. 223). Éste es el cátodo. A través de una "ventanilla" transparente penetra la luz en la ampolla. En el centro de ésta hay un bucle de alambre o un disco (ánodo) que sirve para capturar los fotoelectrones. El ánodo se conecta al polo positivo de una batería. Las células fotoeléctricas que se utilizan reaccionan a la luz visible e incluso a los rayos infrarrojos. Cuando incide la luz sobre el cátodo de la célula, en el circuito se produce una corriente eléctrica que acciona un relé determinado. La combinación de una célula fotoeléctrica con un relé permite construir multitud de dispositivos automáticos capaces de "ver". Uno de estos dispositivos automáticos es el aparato de control de entrada en el metro, que cierra el paso si se cruza un haz luminoso sin depositar previamente una moneda de cinco kopecks.

Aparatos semejantes sirven para evitar averías y accidentes de trabajo. En las fábricas una célula fotoeléctrica puede parar inmediatamente una prensa si en la zona de peligro se halla la mano del operario.

El esquema de un fotorrelé de este tipo se muestra en la fig. 224. Cuando la luz incide sobre la célula fotoeléctrica F, por el circuito de la batería B_1 pasa, a través de la resistencia R, una débil corriente. A los extremos de la resistencia están conectados la rejilla y el cátodo del triodo T. El potencial en el punto C (rejilla) es menor que el potencial en el punto D (cátodo). La lámpara está

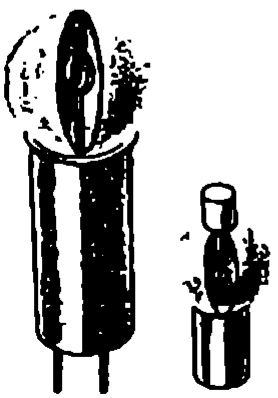


Fig. 223

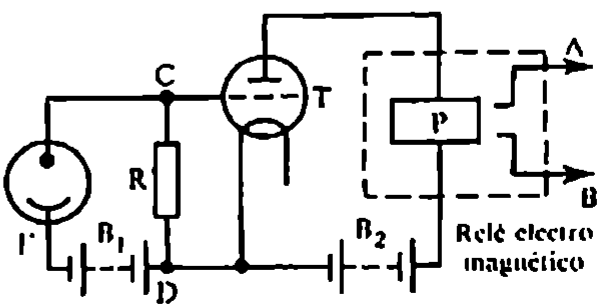


Fig. 224

bloqueada y en el circuito anódico del triodo no hay corriente. Si la mano del operario se encuentra en la zona de peligro, tapa el haz luminoso que va a la célula fotoeléctrica. La lámpara se desbloquea y por el arrollamiento del relé electromagnético intercalado en el circuito anódico pasa corriente. El relé responde y sus contactos cierran el circuito de alimentación del mecanismo que para la prensa.

Por medio de células fotoeléctricas se reproduce el sonido grabado en las películas de cine.

Además del efecto fotoeléctrico que acabamos de estudiar, llamado *efecto fotoeléctrico externo*, existe y tiene diversas aplicaciones el *efecto fotoeléctrico interno* en los semiconductores. Este fenómeno se utiliza en las células fotorresistivas (o fotoconductoras), que son dispositivos cuya resistencia depende de la iluminación. También se construyen células fotoeléctricas semiconductoras, que transforman directamente la energía luminosa en energía de una corriente eléctrica. Estos dispositivos pueden servir de fuentes de corriente y se pueden utilizar para medir la iluminación, por ejemplo, en los exposímetros fotográficos. En este mismo principio se basa el funcionamiento de las baterías solares que se instalan en las naves cósmicas.

10.5. Presión de la luz

Maxwell, basándose en la teoría electromagnética de la luz, predijo que la luz debe ejercer presión sobre los obstáculos.

Bajo la acción del campo eléctrico de la onda, los electrones oscilan en los cuerpos. Se genera una corriente eléctrica. Esta corriente está dirigida a lo largo de la intensidad del campo eléctrico (fig. 225). Sobre el movimiento ordenado de los electrones actúa la fuerza de Lorentz $\vec{F}$ por parte del campo magnético. Según la regla de la mano izquierda, la fuerza de Lorentz está dirigida en el sentido en que se propaga la onda. Esta es la fuerza de la *presión de la luz*.

Para demostrar que la teoría de Maxwell era justa tenía importancia medir la presión de la luz. Muchos científicos intentaron hacerlo, pero no lo

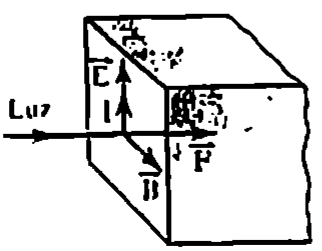


Fig. 225

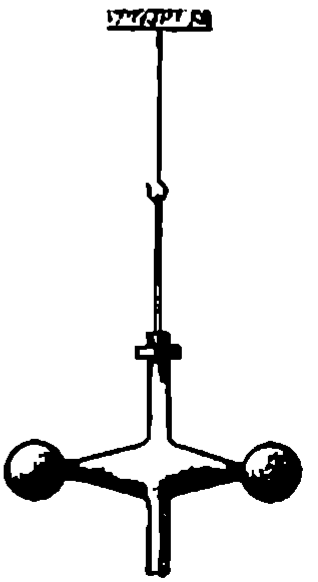
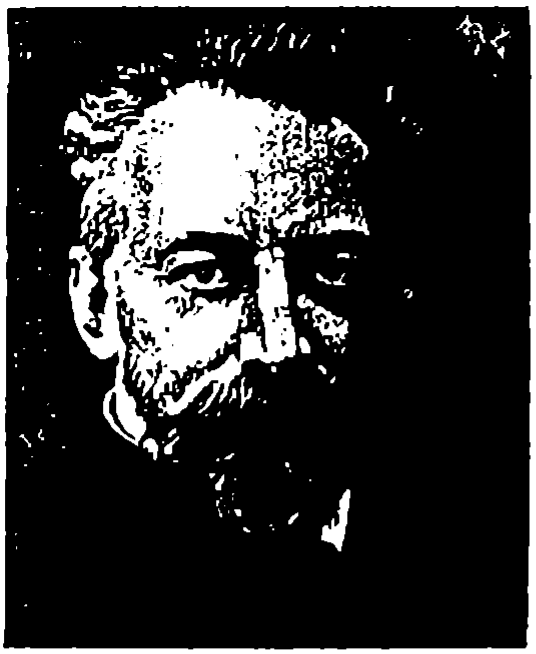


Fig. 226



Piotr Nikoláevich Lebedev (1866–1912), célebre físico ruso. Fue el primero en medir la presión de la luz sobre los sólidos y los gases. Estos trabajos de Lébedev confirmaron cuantitativamente la teoría de Maxwell.
Tratando de hallar nuevas demostraciones experimentales de la teoría electromagnética de la luz, obtuvo ondas electromagnéticas de longitud milimétrica y estudió todas sus propiedades.
Lébedev creó en Rusia la primera escuela de físicos. Fueron discípulos suyos muchos físicos soviéticos destacados. El Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS lleva el nombre de Lébedev.

consiguieron, ya que dicha presión es muy pequeña. En un día de Sol despejado, sobre un metro cuadrado de superficie actúa una fuerza de sólo $4 \cdot 10^{-8}$ N. El primero que logró medir la presión de la luz fue el destacado físico ruso Piotr Nikoláevich LÉBEDEV, en 1900.

El dispositivo que utilizó Lebedev consiste en una varilla muy liviana, suspendida de un hilo de vidrio finísimo, a cuyos extremos estaban pegadas dos aletas también muy ligeras (fig. 226). Todo el dispositivo se colocaba dentro de un recipiente del cual se extraía el aire. La luz incidía sobre las aletas situadas a uno de los lados de la varilla. El valor de la presión se podía apreciar por el ángulo de torsión del hilo. La dificultad de la medición se debía a que era imposible extraer todo el aire del recipiente (el movimiento de las moléculas del aire, producido por el calentamiento desigual de las aletas y de las paredes del recipiente, hace que se originen momentos de rotación adicionales). Además, en la torsión del hilo influye el desigual calentamiento de las caras de las aletas (la cara expuesta a la luz del foco se calienta más que la cara opuesta). Las moléculas que se reflejan en la cara más caliente transmiten a la aleta un impulso mayor que las moléculas que se reflejan en la cara menos caliente.

Lébedev consiguió superar todas estas dificultades, a pesar del bajo nivel de la técnica experimental que entonces existía, utilizando un recipiente muy grande y unas aletas muy delgadas. La existencia de la presión de la luz sobre los sólidos fue por fin demostrada y medida. El valor obtenido coincidió con el predicho por Maxwell. Más tarde, después de tres años de trabajo, Lebedev logró realizar otro experimento aun más delicado: medir la presión de la luz sobre los gases.

La aparición de la teoría cuántica de la luz permitió explicar de un modo más sencillo la causa de la presión de la luz. Los fotones, lo mismo que las partículas de sustancia que poseen masa en reposo, tienen impulso. Al ser absorbidos por un cuerpo, le comunican su impulso. Según la ley de conservación del impulso, el impulso del cuerpo será igual al de los fotones

absorbidos. Por eso el cuerpo en reposo se pone en movimiento. La variación del impulso del cuerpo, según la segunda ley de Newton, significa que sobre el cuerpo actúa una fuerza.

Los experimentos de Lebedev se pueden considerar como la demostración experimental de que los fotones tienen impulso. La ley de conservación del impulso es totalmente general. Esta ley es justa tanto para la substancia ordinaria como para los fotones o cuantos del campo electromagnético.

Aunque la presión de la luz es muy pequeña en las condiciones habituales, su acción puede llegar a ser muy importante. Dentro de las estrellas, a temperaturas de varias decenas de millones de grados, la presión de la radiación electromagnética puede alcanzar una magnitud enorme. Esta presión, junto con las fuerzas de gravitación, desempeña un papel esencial en los procesos intraestelares.

10.6. Acción química de la luz. Fotografía

Las moléculas por separado absorben la energía luminosa en porciones, es decir, en cuantos $h\nu$. En el caso de la luz visible y ultravioleta la radiación de esta energía es suficiente para descomponer muchas moléculas. En esto se manifiesta la *acción química de la luz*, ya que toda transformación de las moléculas es un proceso químico. Es frecuente que, una vez desintegradas las moléculas, por la luz, comience toda una cadena de transformaciones químicas. El descoloramiento de los tejidos sometidos a la luz del Sol y el bronceado de la piel son ejemplos de la acción química de la luz.

Bajo la acción de la luz se producen reacciones químicas muy importantes en las hojas verdes de los árboles y de la hierba, en las aciculares de las coníferas y en muchos microorganismos. En las hojas verdes, bajo la acción de la luz del Sol, se desarrollan procesos imprescindibles para la vida en la Tierra. Estos procesos nos proporcionan los alimentos y el oxígeno para respirar.

Las hojas absorben del aire el anhídrido carbónico y descomponen sus moléculas en las partes que las constituyen: carbono y oxígeno. Como estableció el biólogo ruso Kliment Arkádievich TIMIRIÁZEV, esto tiene lugar en las moléculas de clorofila bajo la influencia de los rayos rojos del espectro solar. Añadiendo a la cadena del carbono átomos de otros elementos, extraídos del suelo por las raíces, los vegetales construyen moléculas de las proteínas, grasas e hidratos de carbono que sirven para alimento del hombre y de los animales.

Se realiza esto a costa de la energía de los rayos solares. Aquí tiene especial importancia no sólo la energía misma, sino la forma en que ella llega. La *fotosíntesis* (así se llama este proceso) sólo puede efectuarse bajo la acción de la luz de un determinado intervalo del espectro.

El mecanismo de la fotosíntesis no se conoce aún en plena medida. Su conocimiento representará quizá para la humanidad el comienzo de una nueva era. Las proteínas y otras sustancias orgánicas complejas se podrán producir en fábricas bajo la bóveda celeste.

La acción química de la luz sirve de base a la *fotografía*.

La capa sensible de las placas y películas fotográficas está formada por pequeños cristales de bromuro de plata (AgBr) diseminados en gelatina. La

a b

Fig. 227

incidencia de los cuantos de luz en los cristalitos hace que se desprendan electrones de algunos iones de bromo. Estos electrones son capturados por los iones de plata y en el cristalito se forma una pequeña cantidad de átomos de plata neutros. Pero la cantidad de plata metálica que se desprende a costa de este proceso es pequeña.

En efecto, puede notarse que una placa (o película) fotográfica expuesta a la luz se ennegrece con el tiempo, pero no mucho. Este ennegrecimiento se debe a la formación de la plata metálica. La imagen invisible que se obtiene sobre la placa fotográfica por la acción de la luz se llama imagen *latente*.

La primera operación a que se somete la placa, una vez impresionada, es el *revelado*. Para esto la placa se introduce en una disolución de hidroquinona, metol u otras sustancias, bajo cuya influencia en todos los cristalitos de bromuro de plata que sufrieron la acción de la luz se produce el desprendimiento de la plata metálica. En la placa se obtiene así la imagen negativa del objeto, en la cual el sitio de las partes claras lo ocupan las oscuras y viceversa (fig. 227, *a*).

La operación siguiente es el *fijado*, que consiste en que los cristalitos de bromuro de plata que quedan se disuelven y eliminan. La placa se hace así insensible a la luz. Para el fijado la placa se introduce en una disolución de hiposulfito. Después se lava y se tiene el negativo acabado.

Colocando el negativo sobre un papel fotográfico, es decir, sobre un papel corriente recubierto de una capa sensible a la luz, se obtiene, después de exponer este último a la luz y de someterlo a un proceso químico análogo al anterior, la imagen positiva (fig. 227, *b*). El positivo tiene ya los mismos tonos de luz que tenía el original (no invertidos).

La fotografía es capaz de registrar, con bastante exactitud y por mucho tiempo, acontecimientos que irreversiblemente se alejan cada vez más en el pasado. Para la ciencia tiene mucha importancia la fotografía. Procesos tan rápidos como, por ejemplo, un relámpago, se pueden fotografiar para después estudiarlos detalladamente.

Objetos que emiten una luz tan débil que el ojo humano no puede percibir, se pueden registrar en una placa fotográfica exponiéndola durante un tiempo suficientemente largo, es decir, sometiéndola mucho tiempo a su iluminación. Precisamente por eso objetos muy lejanos, como las galaxias, se estudian por medio de sus fotografías.

La técnica moderna permite fotografiar no sólo a la luz visible, sino también en la oscuridad, valiéndose de los rayos infrarrojos. Otra aplicación de la fotografía es el registro del sonido en las películas de cine.

---

6. [illegible]

1. ¿Qué hechos prueban que la luz tiene propiedades corpusculares?
2. ¿En qué consisten las leyes fundamentales del efecto fotoeléctrico?
3. ¿A qué es igual la constante de Planck?
4. ¿Cómo se puede determinar la energía, la masa y el impulso del fotón, conociendo la frecuencia de las oscilaciones de la luz ν?
5. ¿En qué caso es mayor la presión de la luz: cuando incide sobre una superficie especular o cuando sobre una superficie negra?

Ejercicio 12

1. Dibujar la gráfica de la energía cinética de los fotoelectrones en función de la frecuencia de la luz. ¿Cómo se puede determinar la constante de Planck valiéndose de esta gráfica?
2. Hallar el índice de refracción absoluto n de un medio en el que la luz, cuyos fotones tienen la energía $E = 4{,}4 \cdot 10^{-19}$ J, tiene la longitud de onda $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ cm.
3. Determinar el valor del cuanto de energía E, correspondiente a la longitud de onda $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ m.
4. Determinar la longitud de onda λ de la luz que ilumina la superficie de un metal, si los fotoelectrones tienen la energía cinética $W_c = 4{,}5 \times 10^{-20}$ J y el trabajo de extracción de un electrón del metal $A = 7{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.
5. ¿Cuál será el umbral rojo ν_{min} del efecto fotoeléctrico si el trabajo de extracción de un electrón del metal $A = 3{,}3 \cdot 10^{-19}$ J?
6. Una radiación de longitud de onda $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ cm incide sobre una sustancia para la cual el umbral rojo del efecto fotoeléctrico $\nu_{min} = 4{,}3 \cdot 10^{14}$ s^{-1}. ¿A qué será igual la energía cinética de los fotoelectrones?
7. ¿Cuál será el impulso del fotón si la longitud de la onda luminosa es $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ cm?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 10

A comienzos del siglo XX fue propuesta la teoría cuántica, es decir, la teoría del movimiento e interacciones de las partículas elementales y de los sistemas formados por ellas.

Para explicar las leyes del movimiento térmico supuso M. Planck que los átomos emiten la energía electromagnética no de un modo continuo, sino en porciones separadas o cuantos. La energía de cada una de estas porciones se determina por la fórmula

$$E = h\nu,$$

en la que $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s es la constante de Planck, y ν es la frecuencia de la luz.

La energía electromagnética también es absorbida en porciones separadas. El efecto fotoeléctrico (extracción de electrones de una sustancia por la acción de la luz) confirma esto. El número de electrones arrancados es proporcional a la intensidad de la luz, y la energía cinética de los electrones está determinada únicamente por la frecuencia de la luz. De acuerdo con las ideas de Einstein, la porción de energía absorbida $h\nu$ se gasta en realizar el trabajo de extracción A, para arrancar el electrón del metal, y en comunicarle a dicho electrón energía cinética:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

Si la frecuencia de la luz $\nu < \nu_{mín} = A/h$, el efecto fotoeléctrico no se observa.

Así, pues, durante la emisión y la absorción de la luz se ponen de manifiesto las propiedades corpusculares de ésta. La partícula de luz se llama cuanto de luz o fotón. La energía del fotón se determina por la fórmula

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

en la que $\hbar = h/2\pi = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ J·s y ω es la frecuencia angular.

El impulso p del fotón se halla por la fórmula $p = h/\lambda$.

En el proceso de su propagación la luz revela sus propiedades ondulatorias (fenómenos de interferencia y de difracción).

Por lo tanto la luz tiene dualidad de propiedades. Más tarde se ha descubierto que el dualismo ondulatorio-corpuscular existe en todas las partículas elementales.

El efecto fotoeléctrico tiene muchas aplicaciones técnicas. En las células fotoeléctricas la energía de la luz regula la energía de una corriente eléctrica o se transforma en ella. Estas células se utilizan en diversos aparatos automáticos capaces de "ver". En el fenómeno del efecto fotoeléctrico se basa el funcionamiento de las baterías solares.

De la teoría de Maxwell se deducía que la luz ejerce presión sobre los obstáculos. Esta presión es muy pequeña. El primero en descubrir experimentalmente la presión de la luz y medirla fue el físico ruso P. N. LÉBEDEV.

La absorción de la luz por la sustancia va acompañada de la acción química de la luz. En las hojas verdes de los vegetales y en muchos microorganismos se producen, por la acción de la luz, reacciones químicas importantísimas. El anhidrido carbónico, que las hojas absorben de la atmósfera, se descompone en carbono y oxígeno. En esto consiste el proceso de la fotosíntesis.

11 FÍSICA ATÓMICA

11.1. Estructura del átomo. Experimentos de Rutherford

El descubrimiento de la estructura compleja del átomo constituyó una etapa importantísima en el proceso de creación de la física moderna, que dejó huella en todo su ulterior desarrollo. Durante el proceso de creación de la teoría cuantitativa de la estructura del átomo, que permitiera explicar los espectros atómicos, fueron descubiertas las nuevas leyes del movimiento de las microparticulas, es decir, las leyes de la *mecánica cuántica*.

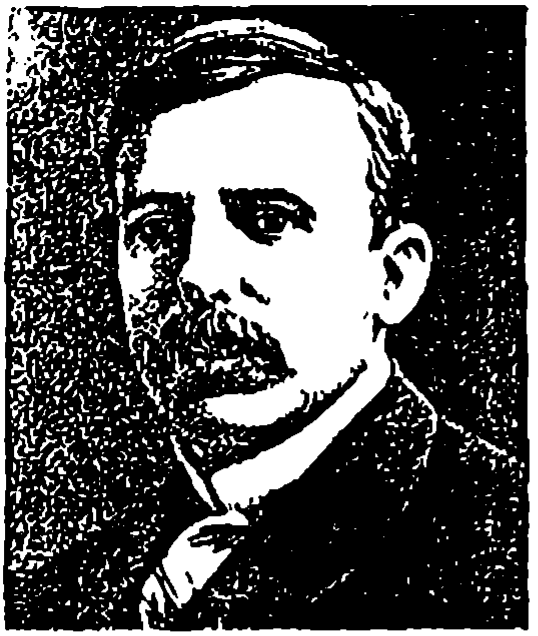
MODELO DE THOMSON. A las representaciones correctas de la estructura atómica los científicos llegaron no de golpe. El primer modelo de átomo fue propuesto por el físico inglés J. J. THOMSON, descubridor del electrón Según Thomson, la carga positiva del átomo ocupa todo el volumen de este y está distribuida en dicho volumen con densidad constante. El átomo más simple, el de hidrógeno, es una esfera, cargada positivamente, de 10^{-8} cm de radio aproximadamente, dentro de la cual hay un electrón En los átomos más complejos dentro de la esfera cargada positivamente hay varios electrones, de manera que el átomo es una especie de "bizcocho con pasas", en el cual el papel de las pasas lo desempeñan los electrones. Pero el modelo de átomo de Thomson resultó que contradecía totalmente los resultados de los experimentos en que se investigó la distribución de la carga positiva en el atomo.

Estos experimentos, que realizó por primera vez el gran físico inglés Ernest RUTHERFORD, tuvieron tanta importancia en el conocimiento de la estructura del átomo, que conviene estudiarlos con más detalle que se hizo en el curso de "Física I" (Ed MIR). Ahora el lector está ya en condiciones de comprender mejor su sentido e importancia.

EXPERIMENTOS DE RUTHERFORD La masa de los electrones es varios millares de veces menor que la masa de los átomos. Y como el átomo en conjunto es neutro, se sigue que la masa fundamental del átomo corresponde a su parte cargada positivamente

Para investigar experimentalmente la distribución de la carga positiva y, por consiguiente, la masa dentro del átomo, propuso Rutherford, en 1906, proceder al sondeo del átomo con partículas α. Como se sabe por el curso de física mencionado, estas partículas surgen al desintegrarse el radio y algunos otros elementos La masa de las partículas α es, aproximadamente, 8000 veces mayor que la del electrón, y su carga positiva es igual al doble del módulo de la carga del electrón. Estas partículas no son ni más ni menos que átomos de helio totalmente ionizados. La velocidad de las partículas α es muy grande e igual a 1/15 de la velocidad de la luz.

Con estas partículas bombardeó Rutherford átomos de elementos pesados



Ernest Rutherford (1871–1937), gran físico inglés nacido en Nueva Zelandia. Sus descubrimientos experimentales sentaron las bases de las ideas modernas sobre la estructura del átomo y la radiactividad. Fue el primero en investigar la composición de las radiaciones de las sustancias radiactivas. Descubrió la existencia del núcleo atómico y por vez primera efectuó la transmutación artificial de los núcleos atómicos. Todos sus experimentos tuvieron carácter fundamental y se caracterizaron por su extraordinaria sencillez y claridad. Discípulos de Rutherford fueron muchos físicos de talento de diversos países: James Chadwick (inglés), Niels Bohr (danés), Piotr Leonidovich Kapitsa (soviético) y otros.

Los electrones, como su masa es pequeña, no pueden desviar sensiblemente la trayectoria de las partículas α, lo mismo que las piedrecitas de varias decenas de gramos al chocar con un automóvil son incapaces de hacer cambiar su velocidad.

La dispersión (es decir, el cambio de dirección del movimiento) de las partículas α sólo podía ser provocada por la parte del átomo cargada positivamente. De este modo, por la dispersión de las partículas α se puede determinar el carácter de la distribución de la carga positiva y de la masa dentro del átomo. El esquema de los experimentos de Rutherford se muestra en la fig. 228. De las partículas α que emitía la preparación radiactiva se separaba, por medio de un diafragma, un haz, el cual incidía después sobre una hoja delgada del material sometido a investigación (oro, cobre, etc.). Una vez dispersas, las partículas α iban a parar a una pantalla recubierta de sulfuro de zinc. El choque de cada partícula con la pantalla iba acompañado de un destello (centelleo), que podía observarse al microscopio.

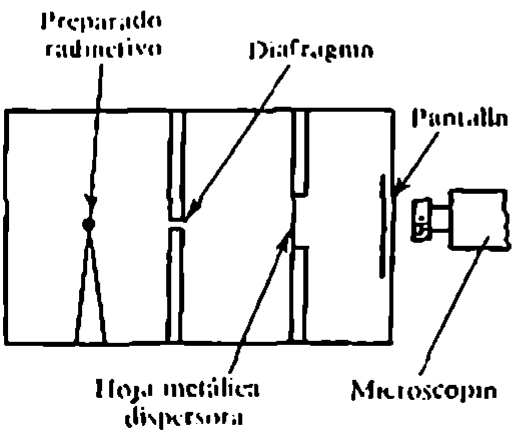


Fig. 228

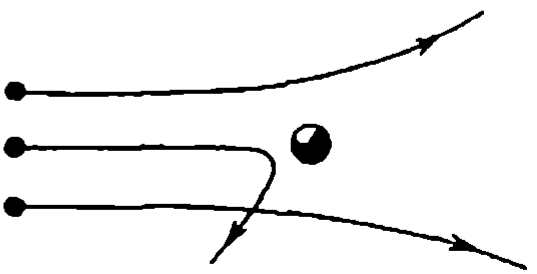


Fig. 229

Cuando el vacío dentro del aparato era suficiente, en ausencia de la hoja metálica, sobre la pantalla se veía una raya debida al centelleo producido por el estrecho haz de partículas α. Pero cuando en el camino del haz se interponía dicha hoja, las partículas α, a causa de la dispersión, se distribuían por una superficie mayor de la pantalla.

Modificando el dispositivo experimental, Rutherford procuró descubrir la desviación de las partículas α en ángulos grandes. Inesperadamente resultó que sólo un pequeño número de partículas α (aproximadamente una de cada dos mil) se desviaba ángulos mayores que 90°. Más tarde reconoció Rutherford que cuando propuso a sus discípulos hacer el experimento para observar la dispersión de las partículas α en ángulos grandes, él mismo no creía en el resultado positivo. "Esto era casi tan improbable—decía Rutherford—como si disparando un proyectil de 15 pulgadas contra una hoja de papel fino, el proyectil rebotara en ella y, de retorno, fuera a caer junto al artillero."

Efectivamente, prever este resultado era imposible. Si la carga positiva estuviera repartida por todo el átomo no podría crear un campo eléctrico suficientemente intenso, capaz de rechazar una partícula α. La fuerza de repulsión máxima se determina por la ley de Coulomb:

$$F_{máx} = \frac{q_\alpha q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}, \qquad (11.1)$$

en la que q_α es la carga de la partícula α; q, la carga positiva del átomo, R, el radio de éste, ε_0, la constante eléctrica. La intensidad del campo eléctrico de una esfera cargada uniformemente es máxima en la superficie de la esfera y va disminuyendo hasta llegar a cero a medida que se aproxima al centro. Por eso, cuanto menor sea R tanto mayor será la fuerza de repulsión de la partícula α.

DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO ATÓMICO. Rutherford comprendió que la partícula α solo podía ser rechazada si la carga positiva del átomo y su masa estaban concentradas en una región del espacio muy pequeña. Así llegó Rutherford a la idea del núcleo atómico, como un cuerpo de pequeñas dimensiones en el cual se halla concentrada casi toda la masa del átomo y toda su carga positiva.

En la fig. 229 se pueden ver las trayectorias de las partículas α que pasan a diferentes distancias del núcleo.

Contando el número de partículas α desviadas en ángulos diferentes, Rutherford pudo apreciar las dimensiones del núcleo. Resultó que el núcleo tiene un diámetro del orden de 10^{-12} a 10^{-13} cm (distintos núcleos tienen diámetros diferentes). El tamaño del propio átomo es de 10^{-8} cm, es decir, de 10 mil a 100 mil veces mayor que las dimensiones del núcleo. Más tarde se consiguió determinar también la carga del núcleo. Si la carga del electrón se toma como unidad, la carga del núcleo es exactamente igual al número de orden del elemento dado químico en la tabla de Mendeléiev.

MODELO PLANETARIO DEL ÁTOMO. De los experimentos de Rutherford se infiere directamente el modelo planetario del átomo. En el centro se encuentra el núcleo atómico, cargado positivamente, en el cual está concentrada casi toda la masa del átomo. En conjunto el átomo es neutro. Por lo tanto, el número de electrones intraatómicos, lo mismo que la carga del núcleo, es igual al número de orden del elemento en el sistema periódico. Está

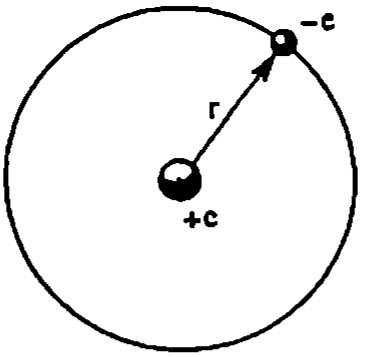


Fig. 230

claro que los electrones no pueden estar en reposo dentro del atomo, ya que de lo contrario caerían en el núcleo. Los electrones se mueven alrededor del núcleo de un modo semejante n como los planetas giran alrededor del Sol. Este carácter del movimiento de los electrones viene determinado por la acción de las fuerzas de Coulomb por parte del núcleo.

En el átomo de hidrógeno se mueve alrededor del núcleo un solo electrón. El núcleo del átomo de hidrógeno tiene una carga positiva igual en módulo a la carga del electrón y una masa 1836,1 veces mayor, aproximadamente, que la masa del electrón Este núcleo recibe el nombre de *protón* y se ha empezado a considerar como una partícula elemental. Por dimensión del átomo se entiende el radio de la órbita de su electrón (fig. 230).

El modelo planetario del átomo, simple e intuitivo, tiene un fundamento experimental directo. Este modelo parece absolutamente necesario para poder explicar los experimentos de dispersión de las partículas α. Pero sobre la base de este modelo es imposible explicar el hecho de la EXISTENCIA del átomo y su ESTABILIDAD ¿Por qué? Porque los electrones se mueven por las órbitas con aceleración y ésta es considerable. Y, según las leyes de la electrodinámica de Maxwell, toda carga que se mueve con aceleración debe radiar ondas electromagnéticas de frecuencia igual al número de sus revoluciones por segundo alrededor del núcleo. La radiación va acompañada de pérdida de energía. Al perder energía, los electrones deben acercarse al núcleo, de un modo semejante a como los satélites artificiales se aproximan a la Tierra al decelerarse en las capas superiores de la atmósfera. Como demuestran los cálculos absolutamente rigurosos, basados en la mecánica de Newton y en la electrodinámica de Maxwell, el electrón debe caer en el núcleo al cabo de un tiempo insignificante (del orden de 10^{-8} s) y el átomo dejar de existir.

En realidad no ocurre esto. Los átomos son estables y en estado no excitado pueden existir un tiempo ilimitado sin radiar ondas electromagnéticas

La discrepancia entre la experiencia y la conclusión de que es inevitable la aniquilación del átomo a causa de la pérdida de energía en radiación, es el resultado de aplicar las leyes de la física clásica a los fenómenos que tienen lugar dentro del átomo. De aquí se sigue que las leyes de la física clásica son inaplicables a los fenómenos de escala atómica.

Niels Bohr (1885–1962), gran físico danés. Creó la primera teoría cuántica del átomo y participó muy activamente en la elaboración de los fundamentos de la mecánica cuántica. Además hizo una gran aportación a la teoría del núcleo atómico y de las reacciones nucleares. En particular, desarrolló la teoría de la fisión nuclear, proceso en el cual se desprende una enorme cantidad de energía.
En Copenhague creó Bohr una gran escuela internacional de físicos y se esforzó por desarrollar la cooperación entre los físicos de todo el mundo. Bohr participó activamente en la lucha contra la amenaza atómica

11.2. Postulados de Bohr

La salida de esta situación tan difícil fue hallada en 1913 por el gran físico danés Niels BOHR, al desarrollar las ideas cuánticas acerca de los procesos que ocurren en la naturaleza.

Einstein calificó el trabajo realizado por Bohr como "la máxima armonía del pensamiento", que siempre le sorprendió. Basándose en hechos experimentales aislados, Bohr, con intuición genial, previó acertadamente la esencia del problema.

Bohr, sin embargo, no propuso una teoría consecuente del átomo. Solo enunció en forma de postulados los principios básicos de la nueva teoría. Con la particularidad de que las leyes de la física clásica no eran rechazadas incondicionalmente por ellos. Los nuevos postulados más bien imponían solamente ciertas limitaciones a los movimientos que la física clásica consideraba permisibles.

No obstante, el éxito de la teoría de Bohr fue asombroso y todos los físicos comprendieron que Bohr había encontrado el buen camino para desarrollar la teoría. Este camino condujo después a la creación de la armoniosa teoría del movimiento de las microparticulas, la *mecánica cuántica*.

El PRIMER POSTULADO de Bohr dice: un sistema atómico solo puede encontrarse en determinados estados estacionarios o cuánticos, a cada uno de los cuales corresponde una energía E_n también determinada, en estado estacionario el átomo no radia.

Este postulado está en clara contradicción con la mecánica clásica, según la cual la energía de los sistemas en movimiento puede ser cualquiera. También contradice la electrodinámica de Maxwell, puesto que admite la posibilidad del movimiento acelerado de los electrones sin emisión de ondas electromagnéticas.

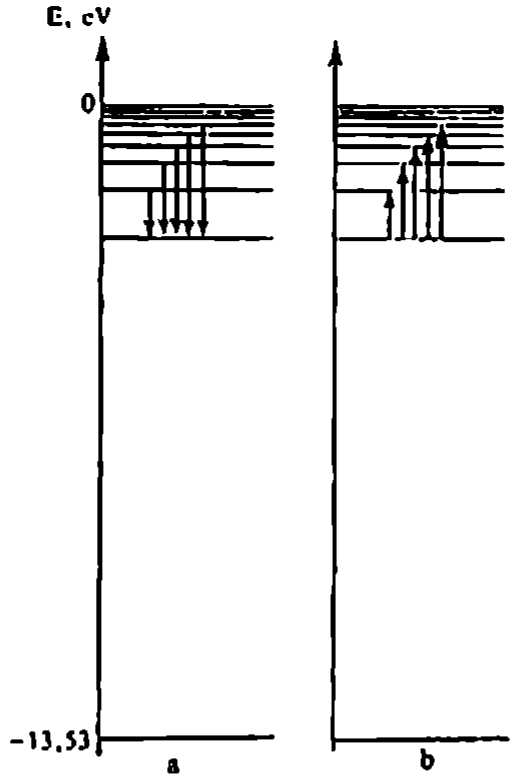


Fig. 231

De acuerdo con el SEGUNDO POSTULADO de Bohr, cuando el átomo pasa de un estado estacionario a otro emite o absorbe un cuanto de energía electromagnética.

La emisión se produce cuando el átomo pasa de un estado con mas energía a un estado cuya energía es menor (fig. 231, *a*)

La absorción de energía por el átomo va acompañada del paso del átomo de un estado de menor energía a un estado de energía mayor (fig. 231, *b*).

La energía del fotón es igual a la diferencia de energía del átomo en dos de sus estados estacionarios:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n, \tag{11.2}$$

donde k y n son los números de los estados estacionarios. Si $E_k > E_n$ se produce la emisión de un fotón, y si $E_k < E_n$, su absorción.

La frecuencia de las oscilaciones correspondiente al cuanto de radiación emitido (o absorbido) se determina por la fórmula

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \tag{11.3}$$

El segundo postulado también contradice la electrodinámica de Maxwell, ya que según este postulado la frecuencia de la luz emitida pone de manifiesto no las peculiaridades del movimiento de los electrones, sino únicamente la variación de la energía del átomo.

11.3. Modelo del átomo de hidrógeno según Bohr

Bohr aplicó sus postulados a la construcción de la teoría del sistema atómico más simple, el átomo de hidrógeno

El problema fundamental consistía en hallar las frecuencias de las ondas electromagnéticas que emite el hidrógeno. Estas frecuencias pueden hallarse basándose en el segundo postulado, si se dispone de una regla para determinar los valores estacionarios de la energía del átomo Esta regla también tuvo que ser postulada por Bohr.

ENERGÍAS DE LOS ESTADOS ESTACIONARIOS Y RADIOS DE LAS ÓRBITAS ELECTRÓNICAS CORRESPONDIENTES A ELLOS. Bohr consideró las óbitas más simples, las circulares. La energía potencial de la interacción del electron con el núcleo se determina por la fórmula

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r},$$

en la que e es el módulo de la carga del electrón; r, la distancia del electron al núcleo. La constante arbitraria salvo la cual se determina la energía potencial se ha tomado aquí igual a cero. La energía potencial es negativa, porque las cargas de las partículas que interaccionan tienen signos contrarios.

La energía total E del átomo, según la mecánica de Newton, es igual a la suma de las energías cinética y potencial:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (11.4)$$

Entre la velocidad del electrón y el radio de su órbita existe la relación que se infiere de la segunda ley de Newton La aceleración centrípeta v^2/r se la comunica al electrón en la órbita la fuerza de Coulomb. Por lo tanto,

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

o bien

$$mrv^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (11.5)$$

Sustituyendo la velocidad, en la fórmula (11.4), por su valor deducido de (11.5), se obtiene que

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (11.6)$$

Según la mecánica clásica el radio de la órbita puede tomar un valor cualquiera. Por consiguiente, la energía también puede tener cualquier valor.

Pero, por el primer postulado de Bohr, la energía sólo puede tomar determinados valores E_n. Por eso, según (11.6), los radios de las órbitas en el átomo de hidrógeno tampoco pueden ser arbitrarios. La regla de cuantización de Bohr establece los posibles radios de las órbitas y, respectivamente, los posibles valores de la energía en el átomo.

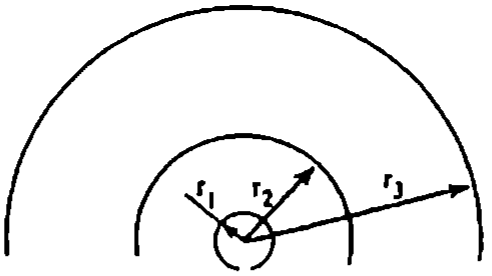


Fig. 232

Cuando el electrón se mueve por una órbita circular, el módulo del impulso mv y el radio de la órbita r permanecen invariables. Por lo tanto, también será constante la magnitud mvr. En mecánica esta magnitud se llama momento de impulso[1]. Bohr advirtió que la constante de Planck se designa con las mismas unidades de medida que el momento de impulso.

$$J\ s = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \text{m}.$$

Y como estaba seguro de que la constante de Planck debería desempeñar un papel fundamental en la teoría del átomo, supuso Bohr que el producto del módulo del impulso por el radio de la órbita debe ser múltiplo de la constante de Planck h:

$$mvr = nh,$$

siendo $n = 1, 2, 3, \ldots$ Esta es la *regla de cuantización*. Con ella se puede excluir la velocidad de la fórmula (11.5) y obtener la expresión para los posibles radios de las órbitas:

$$r_n = 4\pi\varepsilon_0 \frac{h^2 n^2}{me^2}. \tag{11.7}$$

Los radios de las órbitas de Bohr varían discretamente al variar el número n (fig. 232). La constante de Planck, la masa y la carga del electrón determinan los valores posibles de las órbitas electrónicas. Teniendo en cuenta que la masa del electrón es $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, se halla el radio de la órbita menor.

$$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0 h^2}{me^2} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \tag{11.8}$$

Éste es precisamente el radio del átomo. La teoría de Bohr da para él un valor correcto. Las dimensiones del átomo vienen determinadas por las leyes cuánticas (el radio se determina por el cuadrado de la constante de Planck). La teoría clásica no puede explicar por qué las dimensiones del átomo son del orden de 10^{-11} m.

Sustituyendo r en la fórmula (11.6) por las expresiones de los radios de las órbitas (11.7), se obtienen los valores de las energías de los estados estacionarios

[1] También recibe el nombre de momento cinético, momento angular y momento de la cantidad de movimiento (*N. del T.*).

del átomo (niveles de energía):

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}. \qquad (11.9)$$

En la fig. 231, *a* y *b* estos valores de la energía se han tomado sobre los ejes verticales. En el estado de energía inferior ($n = 1$)

$$E_1 = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{2\hbar^2} = -2{,}168\cdot 10^{-18}\ \text{J} = -13{,}55\ \text{eV}.$$

En este estado el átomo puede encontrarse indefinidamente. Para ionizar el átomo de hidrógeno, es decir, para arrancarle el electrón, hay que comunicarle la energía de 13,55 eV. Esta energía recibe el nombre de *energía de ionización*.

Todos los estados con $n = 2, 3, 4, \ldots$ corresponden al átomo excitado. El período de vida en estos estados es del orden de 10^{-8} s. Durante este período el electrón tiene tiempo de dar cerca de un millón de vueltas alrededor del núcleo.

EMISIÓN DE LUZ. De acuerdo con el segundo postulado de Bohr, las posibles frecuencias de radiación del átomo de hidrógeno se determinan por la fórmula

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right), \qquad (11.10)$$

donde

$$R = \frac{me^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2 \cdot 4\pi\hbar^3} \approx 3{,}29\cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}$$

es una magnitud constante.

Los resultados que se obtienen de la teoría de Bohr concuerdan cuantitativamente con los datos experimentales de las frecuencias que emite el átomo de hidrógeno. Todas las frecuencias de radiación del átomo de hidrógeno forman varias series, a cada una de las cuales corresponde un valor determinado del número n y distintos valores del número $k > n$.

La radiación de las frecuencias de una serie dada se produce durante las transiciones de los niveles de energía superiores a uno de los inferiores. Las transiciones al primer estado excitado (es decir, al segundo nivel de energía desde los niveles superiores) forman la *serie de Balmer*. En la fig. 231, *a* estas transiciones se representan por medio de flechas. Las rayas roja, verde y azules de la parte visible del espectro del hidrógeno (véase la fig. V,3 de las láminas en color) corresponden a las transiciones

$$E_3 \to E_2,\ E_4 - E_2,\ E_5 \to E_2 \text{ y } E_6 \to E_2$$

Esta serie lleva el nombre del científico suizo J. J. BALMER, que, ya en 1885, basándose en un experimento, había establecido que las frecuencias de la parte visible del espectro del hidrógeno satisfacen la relación

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

ABSORCIÓN DE LA LUZ. La absorción de la luz es el proceso inverso a la emisión. El átomo, al absorber la luz, pasa de los estados de energía inferiores a los superiores. En este caso absorbe las mismas frecuencias que emite al pasar de los estados de energía superiores a los inferiores. En la fig. 231, *b* las flechas representan las transiciones del átomo de unos estados a otros absorbiendo luz.

11.4. Demostración experimental de la existencia de los estados estacionarios

Los éxitos de la teoría del átomo fueron obtenidos a cambio de renunciar a los principios fundamentales de la mecánica clásica, que durante 200 años había sido considerada indudablemente correcta. Por eso tuvo gran importancia la demostración experimental directa de que los postulados de Bohr eran justos, sobre todo el primero, acerca de la existencia de los estados estacionarios. El segundo postulado puede considerarse como una consecuencia de la ley de conservación de la energía y de la hipótesis de la existencia real de los fotones.

La existencia de los estados estacionarios fue demostrada en los experimentos hechos por los físicos alemanes James FRANCK y Gustav HERTZ en 1913. La idea de estos experimentos es la siguiente: para descubrir los estados estacionarios hay que investigar el comportamiento del átomo cuando se le transmiten determinadas cantidades de energía. Si los estados estacionarios no existieran, es decir, si la energía interna del átomo pudiera tomar valores cualesquiera, al cederle cierta cantidad de energía lo excitaríamos necesariamente, es decir, aumentaríamos su energía interna. Pero si los estados estacionarios existen, para aumentar la energía interna del átomo habrá que comunicarle a éste una cantidad de energía mayor que la diferencia de energía entre dos estados estacionarios inferiores. Si se le transmite menos cantidad de energía el átomo no se excitará y la energía comunicada sólo servirá para aumentar la energía cinética del átomo en conjunto.

Lo más fácil para transmitir a los átomos una energía determinada es bombardearlos con electrones acelerados por un campo eléctrico. Pasando por una diferencia de potencial U, el electrón adquiere la energía cinética

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

El esquema de la instalación experimental de Franck y Hertz se muestra en la fig. 233. La ampolla de vidrio con tres electrodos está llena de vapor de mercurio a baja presión. La batería B_1 crea el campo eléctrico acelerador. La tensión U entre el cátodo K y la rejilla R se puede regular por medio de un potenciómetro. Entre la rejilla y el ánodo se crea, con ayuda de la batería B_2, un débil campo retardador (la tensión retardadora es de 0,5 V aproximadamente). Este campo impide que lleguen al ánodo los electrones lentos. Los electrones son emitidos por el cátodo K, caldeado por una corriente eléctrica.

Experimentalmente se determina la dependencia de la intensidad de la corriente I en el circuito anódico, respecto de la tensión U. La curva obtenida se

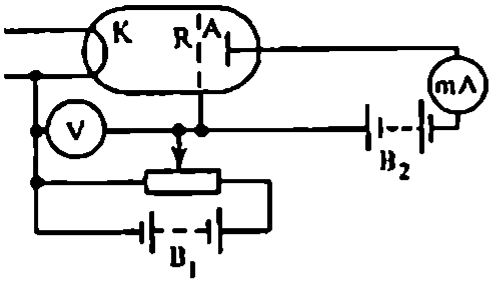


Fig. 233

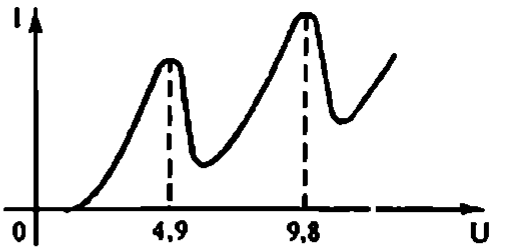


Fig. 234

representa en la fig. 234. La intensidad de la corriente alcanza su primer máximo cuando la tensión es de 4,9 V Después sigue una caída brusca de la intensidad de la corriente El máximo siguiente se obtiene con la tensión de 9,8 V y así sucesivamente. Esta dependencia de I respecto de U sólo puede explicarse por la existencia de estados estacionarios en los átomos de mercurio.

A tensiones inferiores a 4,9 V los choques de los electrones con los átomos son elásticos La energía interna de los átomos no varía. La energía cinética de los electrones casi no varía en este caso, debido a que la masa del electrón es mucho menor que la masa de los átomos de mercurio. Como resultado los electrones acelerados por el campo eléctrico entre el cátodo y la rejilla, vencen el campo retardador y llegán al ánodo. El número de electrones, que llegan al ánodo en la unidad de tiempo, crece proporcionalmente a la tensión

Cuando la tensión se eleva hasta 4,9 V, los choques de los electrones con los átomos empiezan a ser inelásticos. La energía interna de los átomos aumenta de golpe y el electrón, después de la colisión, pierde casi toda su energía cinética. El campo retardador no deja que los electrones lentos pasen hasta el ánodo y la intensidad de la corriente disminuye bruscamente. La corriente no desciende hasta cero sólo porque cierta parte de los electrones llegan a la rejilla sin experimentar colisiones inelásticas.

El electrón adquiere la energía necesaria para la colisión inelástica después de pasar por una diferencia de potencial de 4,9 V. De aquí se sigue que *la energía interna de los átomos de mercurio no puede variar en una magnitud menor que* $\Delta E = 4{,}9$ eV. Por lo tanto, la energía interna del átomo no puede tener valores arbitrarios ni puede variar en valores cualesquiera. Esto confirma la existencia en el átomo de un conjunto discreto de *estados estacionarios*[1].

La exactitud de esta conclusión la confirma también el hecho de que, a la tensión de 4,9 V, el vapor de mercurio empieza a radiar. La frecuencia de radiación, calculada por la fórmula

$$\nu = \frac{\Delta E}{h},$$

coincide con la que se observa experimentalmente. Esto significa que los átomos de mercurio excitados saltan después al estado de energía inferior y emiten cuantos de luz de acuerdo con el segundo postulado de Bohr.

[1] El segundo máximo de la curva representada en la fig. 234 se debe a que a la tensión de 9,8 V los electrones, en su recorrido hasta la rejilla, sufren dos veces choques inelásticos.

11.5. Dificultades de la teoría de Bohr

La teoría de Bohr logró su mayor éxito al ser aplicada al átomo de hidrógeno, para el cual fue posible construir la teoría cuantitativa del espectro.

Pero la teoría cuantitativa del átomo que sigue al de hidrógeno, es decir, del helio, no pudo construirse ya basándose en las ideas de Bohr. Del átomo de helio y de los átomos más complejos la teoría de Bohr sólo permitía sacar conclusiones cualitativas (aunque muy importantes)

Esto no debe extrañar. La teoría de Bohr es una teoría híbrida y tiene contradicciones internas. Por una parte, como se ha visto, en la construcción de la teoría del átomo de hidrógeno se utilizan las leyes ordinarias de la mecánica de Newton y la ley, conocida desde hace ya mucho tiempo, de Coulomb, y por otra parte, se introducen los postulados cuánticos, que no tienen relación alguna con la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell. La introducción en la física de las ideas cuánticas requería una reconstrucción radical de la mecánica y la electrodinámica. Esta reconstrucción se llevó a cabo a comienzos del segundo cuarto de nuestro siglo, en que fueron creadas las nuevas teorías físicas: la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica

Los postulados de Bohr resultaron ser totalmente correctos Pero aparecen ya no como postulados, sino como consecuencia de los principios fundamentales de estas teorías. La regla de cuantización de Bohr sólo ha quedado como una consecuencia aproximada no siempre aplicable.

La idea de las órbitas determinadas, por las cuales se mueve el electrón en el átomo de Bohr, resultó ser muy convencional. En realidad el movimiento del electrón en el átomo tiene muy poco de común con el movimiento de los planetas por sus órbitas. Si el átomo de hidrógeno en su estado de energía más bajo se pudiera fotografiar con gran tiempo de exposición, se vería una nube cuya densidad máxima se encontraría a una distancia determinada del núcleo. Esta distancia puede tomarse como burda semejanza del radio de la órbita. Ella coincide precisamente con el radio de Bohr (11 8). La fotografía del átomo no se parecería en nada a la representación del sistema solar a que estamos acostumbrados, más bien recordaría la mancha borrosa que podría obtenerse fotografiando una mariposa de esas que de noche vuelan alocadamente alrededor de una lámpara[1].

Hoy, valiéndose de la mecánica cuántica, se puede dar respuesta a cualquier pregunta concerniente a la estructura y a las propiedades de las capas electrónicas de los átomos. Pero la parte cuantitativa es bastante complicada y no vamos a estudiarla La descripción cualitativa de las capas electrónicas de los átomos se dio a conocer en el curso de química.

---

[1] Aquí se tiene en cuenta la semejanza de las imágenes sólo en promedio, durante un tiempo de exposición grande. El movimiento del electrón no puede identificarse con el revoloteo de la mariposa ni con el movimiento de ningún otro cuerpo macroscópico.

11.6. Láseres

RADIACIÓN INDUCIDA. En 1917 Einstein predijo la posibilidad de la llamada radiación inducida (estimulada) de luz por los átomos. Se entiende por radiación inducida la radiación de los átomos excitados por la acción de la luz que incide sobre ellos. Una peculiaridad importante de esta radiación es que la onda luminosa que se produce en ella no se diferencia de la onda que incide sobre el átomo NI POR LA FRECUENCIA, NI POR LA FASE, NI POR LA POLARIZACIÓN.

En la terminología de la teoría cuántica la radiación inducida significa la transición del átomo de un estado de energía superior al inferior, pero no espontánea, como en la radiación corriente, sino bajo la influencia de una acción exterior.

LASERES Ya en el año 1940 el físico soviético V. A. FABRIKANT indicó la posibilidad de utilizar el fenómeno de la radiación inducida para amplificar las ondas electromagnéticas. En 1954 los científicos soviéticos N. G. BÁSOV y A. M. PRÓJOROV, e independientemente de ellos el físico norteamericano Ch. TOWNES, emplearon el fenómeno de la radiación inducida para crear el generador de ondas ultrahertzianas, de longitud $\lambda = 1{,}27$ cm. Por sus trabajos sobre el nuevo principio de generación y amplificación de las ondas hertzianas, N. G. Básov y A. M. Prójorov fueron galardonados en 1959 con el premio Lenin, y en 1963, ellos dos y Ch. Townes recibieron el premio Nobel.

En 1960, en EE. UU. fue creado el primer *láser*[1], generador cuántico de ondas electromagnéticas en la gama visible del espectro.

PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN LÁSER. Las fuentes de luz láser ofrecen una serie de ventajas importantes en comparación con las otras fuentes de luz:

1. Los láseres son capaces de crear haces de luz muy estrechos con ángulos de divergencia de 10^{-5} rad, aproximadamente. En la Luna un haz de este tipo, emitido desde la Tierra, produce una mancha de 3 km de diámetro.

2. La luz láser es de una monocromaticidad extraordinaria. A diferencia de los focos de luz habituales, cuyos átomos emiten luz independientemente unos de otros, en los láseres los átomos emiten la luz en concordancia. Por eso la fase de la onda no experimenta variaciones irregulares.

3. Los láseres son las fuentes de luz más potentes que existen. En un estrecho intervalo del espectro se consigue durante poco tiempo (en un lapso del orden de 10^{-11} s) una potencia de radiación de 10^{13} W por centímetro cuadrado, mientras que la potencia de radiación del Sol es de sólo $7 \cdot 10^3$ W por centímetro cuadrado, además en total para todo el espectro. En el estrecho intervalo $\Delta\lambda = 10^{-6}$ cm (anchura de la raya espectral del láser) el Sol sólo emite 0,2 W/cm^2. La intensidad del campo eléctrico de la onda electromagnética emitida por el láser es mayor que la intensidad del campo dentro del átomo.

---

[1] La palabra *láser* es la sigla de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ("amplificación de la luz por medio de la radiación estimulada").

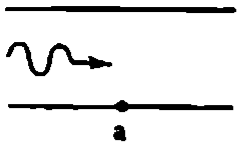


Fig. 235

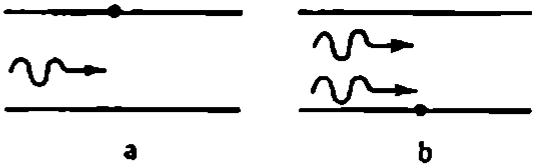


Fig. 236

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER En condiciones normales la mayoría de los átomos se encuentran en el estado de energía más bajo Por eso a bajas temperaturas la sustancia no emite luz.

Cuando una onda electromagnética pasa a través de una sustancia su energía es absorbida. A expensas de la energía absorbida de la onda, parte de los átomos se excitan, es decir, pasan a un estado de energía superior. Al ocurrir esto el haz luminoso cede la energía

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

igual a la diferencia de energía entre los niveles *2* y *1* En la fig. 235, *a* se representa esquemáticamente el átomo no excitado y la onda electromagnética, en forma de un trozo de sinusoide El electrón se encuentra en el nivel bajo. En la fig. 235, *b* se representa el átomo excitado después de absorber la energía. El átomo excitado puede ceder su energía a los átomos vecinos, al chocar con ellos, o emitir un fotón en cualquier dirección.

Ahora imaginémonos que, empleando algún procedimiento, se excita gran parte de los átomos de un medio. Entonces, si a través de dicho medio pasa una onda electromagnética de frecuencia

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

esta onda no se debilitará, sino, al contrario, se reforzará a expensas de la radiación inducida. Bajo su influencia los átomos pasan en concordancia a niveles de energía inferiores, emitiendo ondas que coinciden en frecuencia y en fase con la onda incidente. En la fig 236, *a* se muestra el átomo excitado y la onda, y en la fig. 236, *b* se indica esquemáticamente que el átomo pasó a su estado fundamental y la onda se ha reforzado.

SISTEMA DE TRES NIVELES. Existen diversos métodos para obtener el medio con los átomos en estado excitado. En el láser de rubí se utiliza para esto una potente lámpara especial Los átomos se excitan a costa de la absorción de la luz.

Pero para que el láser funcione dos niveles de energía son insuficientes. Por muy potente que sea la lámpara, el número de átomos excitados no será mayor que el número de átomos no excitados, ya que la luz, al mismo tiempo que excita los átomos, provoca las transiciones inducidas del nivel superior al inferior.

La salida se halló utilizando tres niveles de energía (el número total de niveles es siempre grande, pero aquí se trata de los niveles que "trabajan"). En la fig. 237 vienen representados tres niveles de energía. Es esencial que, en ausencia de la acción exterior, el tiempo durante el cual el sistema se encuentra

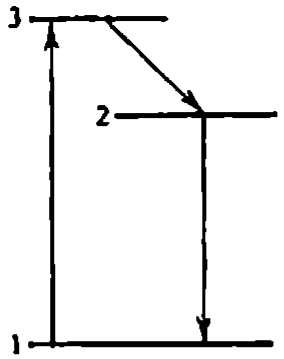


Fig. 237

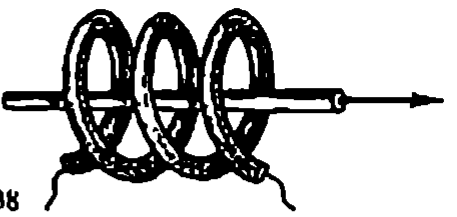


Fig. 238

en distintos estados de energía ("periodo de vida" o simplemente "vida") es muy desigual. En el nivel *3* vive el sistema muy poco, aproximadamente, 10^{-8} s, después de lo cual pasa espontáneamente al estado *2* sin emitir luz. (La energía se transmite en este caso a la red cristalina.) El periodo de vida en el estado *2* es 100 000 veces mayor, es decir, del orden de 10^{-3} s. La transición del estado 2 al *1*, bajo la acción de la onda electromagnética exterior, va acompañada de radiación Esto se aprovecha en los láseres. Después del destello de la potente lámpara el sistema pasa al estado *3* y al cabo de un intervalo de tiempo, de alrededor de 10^{-8} s, resulta en el estado *2*, en el cual su vida es relativamente larga. De este modo se crea la "superpoblación" del nivel excitado *2*, en comparación con el nivel no excitado *1* Los niveles de energía necesarios existen en el cristal de rubí. El rubí es un cristal rojo vivo de óxido de aluminio Al_2O_3 con impurezas de átomos de cromo (0,05% aproximadamente). Los niveles de los iones de cromo en el cristal son los que tienen las propiedades requeridas

ESTRUCTURA DEL LÁSER DE RUBÍ. De un cristal de rubí se hace una varilla con los extremos plano-paralelos. Una lámpara de descarga en gas, de forma helicoidal (fig. 238), da luz azul-verdosa. El impulso de corriente, de corta duración, que produce una batería de condensadores de varios millares de microfaradios de capacidad, provoca un destello de la lámpara. Al cabo de poco tiempo el nivel de energía 2 está "superpoblado".

Como resultado de las transiciones espontáneas $2 \rightarrow 1$, empiezan a ser emitidas ondas en todas las direcciones posibles. De estas ondas, aquellas que marchan formando ángulo con el eje del cristal salen de él y en los procesos ulteriores no desempeñan papel alguno. Pero la onda que marcha a lo largo del eje del cristal se refleja muchas veces en sus extremos. Esta onda hace que se produzca la radiación inducida de los iones de cromo excitados y se refuerza rápidamente.

Uno de los extremos de la varilla de rubí se hace especular y el otro semitransparente. A través de este último sale un potente impulso de corta duración (de un centenar de microsegundos aproximadamente) de luz roja que posee las propiedades fenomenales de que se habló al principio de este párrafo. La onda es coherente, puesto que todos los átomos radian en concordancia, y muy potente, ya que durante la radiación inducida toda la energía acumulada se desprende en muy poco tiempo.

OTROS TIPOS DE LASERES. El láser de rubí que acabamos de estudiar funciona en régimen de impulsos Existen láseres de acción continua.

En los láseres de gas de este tipo la materia emisiva es un gas. Los átomos de dicha materia se excitan por medio de una descarga eléctrica.

Se utilizan también láseres semiconductores de acción continua. Estos láseres fueron creados por primera vez en la URSS. En ellos la energía para la radiación se toma de una corriente eléctrica

Se construyen láseres gasodinámicos de acción continua de centenares de kilovatios de potencia. En ellos la "superpoblación" de los niveles de energía superiores se crea por expansión y enfriamiento adiabático de flujos gaseosos ultrasonoros calentados hasta varios millares de grados.

APLICACIONES DE LOS LASERES. Ofrece amplias perspectivas la utilización del rayo láser para comunicaciones, especialmente espaciales, ya que en el espacio cósmico no existen nubes que puedan absorber la luz.

La enorme potencia del rayo láser se utiliza para volatilizar materiales en el vacío, para soldar, etc. Con el rayo láser se pueden hacer operaciones quirúrgicas, como, por ejemplo, "soldar" la retina desprendida del fondo del ojo.

Los láseres dan la posibilidad de obtener imágenes en volumen de los objetos, aprovechando la coherencia del rayo.

Con los láseres se ha podido construir el *localizador óptico*, que permite medir la distancia hasta los objetos con una exactitud de hasta varios milímetros. Esta exactitud no puede lograrse con los radares.

Excitando por medio de la radiación de láser los átomos o las moléculas se pueden provocar reacciones químicas entre ellos que en las condiciones normales no se producen.

Tiene perspectivas la aplicación de potentes rayos láser para efectuar la reacción termonuclear controlada (véase el capítulo 12).

En la actualidad son ya tan diversas y numerosas las aplicaciones de los láseres que aquí es imposible enumerarlas.

¿ ?

1. ¿Por qué las partículas cargadas negativamente del átomo no ejercen influencia sobre la dispersión de las partículas α?
2. ¿Por qué las partículas α no podrían ser dispersadas en ángulos grandes si la carga positiva del átomo estuviera distribuida por todo su volumen?
3. El modelo planetario del átomo no está de acuerdo con las leyes de la física clásica, ¿por qué?
4. ¿En qué consisten los postulados de Bohr?
5. ¿En qué difieren la radiación láser y la de una lámpara de incandescencia?

Ejercicio 13

1. ¿Cuántas veces menores se hacen el radio de la órbita y la energía del átomo de hidrógeno cuando éste pasa del estado con número $k = 5$ al estado con número $n = 1$?
2. ¿Cuáles son la velocidad v y la aceleración a del electrón en la primera órbita de Bohr?
3. ¿Hasta qué distancia mínima r_{min} se aproximan en un choque central una partícula α y un núcleo de estaño? La velocidad de la partícula α es igual a 10^9 cm/s y su masa $6{,}7 \cdot 10^{-24}$ g. El átomo de estaño se supone que está en reposo.

4. Determinar la longitud de onda λ de la luz que emite el átomo de hidrógeno al pasar del estado estacionario con número $k = 4$ al estado con número $n = 2$?
5. Determinar la longitud de onda mínima de la serie de Balmer.

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 11

Rutherford, estudiando la dispersión de las partículas α por la sustancia, dedujo la existencia del núcleo atómico. La carga positiva y casi toda la masa del átomo están concentradas en el núcleo atómico, cuyas dimensiones son del orden de magnitud de 10^{-12} a 10^{-13} cm. (Esta magnitud es de 10 mil a 100 mil veces menor que las dimensiones del átomo, cuyo orden de magnitud es de 10^{-8} cm). La carga del núcleo atómico es igual al número de orden del elemento en la tabla de Mendeléiev, multiplicado por el módulo de la carga del electrón. El núcleo del átomo de hidrógeno es el protón.

Basándose en sus experimentos, Rutherford propuso el modelo planetario del átomo. En este modelo los electrones giran alrededor del núcleo de un modo semejante a como los planetas giran alrededor del Sol Pero, de acuerdo con las leyes de la física clásica, este átomo no puede ser estable, ya que los electrones deben radiar, perdiendo energía, y caer en el núcleo. En realidad se observa lo contrario, todos los átomos son estables.

La salida a estas dificultades la encontró Bohr por la vía del desarrollo de la teoría cuántica. Bohr propuso dos postulados que contradicen la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell.

El primer postulado de Bohr dice: un sistema atómico sólo puede encontrarse en determinados estados estacionarios o cuánticos, a cada uno de los cuales corresponde una energía E_n también determinada; en estado estacionario el átomo no radia.

De acuerdo con el segundo postulado de Bohr, la radiación o absorción de luz se produce cuando el átomo pasa de un estado estacionario a otro La energía del fotón emitido o absorbido es igual a la diferencia de energía entre los estados estacionarios:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

Bohr introdujo también una regla de cuantización que permite determinar los radios posibles de las órbitas del electrón y los valores de la energía del átomo de hidrógeno, correspondientes a los estados estacionarios:

$$r_n = 4\pi\varepsilon_0 \frac{h^2 n^2}{me^2},$$

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \frac{me^4}{2h^2 n^2},$$

donde $n = 1, 2, 3, \ldots$ son números enteros.

La teoría de Bohr da los valores correctos de todas las frecuencias del espectro de rayas de la radiación del hidrógeno. Permite también determinar teóricamente el radio del átomo de hidrógeno y su energía de ionización

Por medio de experimentos directos se demostró que los estados estacionarios existen en realidad (experimentos de Franck y Hertz).

No obstante, la teoría de Bohr no es lógicamente consecuente Sobre su base no fue posible construir la teoría cuantitativa de los átomos más complejos (átomo de helio y otros). La introducción de las ideas cuánticas requería una reconstrucción radical de la mecánica y de la electrodinámica. Esta reconstrucción se llevó a cabo en los años 20 de nuestro siglo. Fueron creadas la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica

Basándose en la teoría cuántica de la radiación se han construido los generadores cuánticos de ondas hertzianas y los generadores cuánticos de luz visible o láseres. Estos últimos crean una radiación coherente de potencia muy grande. La radiación de láser encuentra amplísimas aplicaciones en diversas ramas de la ciencia y de la técnica.

12 FÍSICA DEL NÚCLEO ATÓMICO

12.1. Núcleo atómico y partículas elementales

Los términos *núcleo atómico* y *partículas elementales* ya se han mencionado muchas veces Ya sabemos que el átomo esta formado por un núcleo y electrones. El propio núcleo está constituido por partículas elementales.

Se llama física nuclear la parte de la física que estudia la estructura y la transformación de los núcleos atómicos.

En este capítulo se tratará de las partículas que componen el núcleo atómico, de cómo los núcleos se transforman unos en otros, de la estructura de un reactor atómico, de por qué en las reacciones nucleares se libera una cantidad enorme de energía y de lo que esta energía puede dar a la humanidad

Al principio no existía la división en *física nuclear y física de las partículas elementales* Con la diversidad del mundo de las partículas elementales los físicos chocaron al estudiar los procesos nucleares. La separación de la física de las partículas elementales como rama independiente de investigación ocurrió hace relativamente poco tiempo, alrededor del año 1950. Ahora tenemos dos partes independientes de la física: el contenido de una de ellas constituye el estudio de los núcleos atómicos, el de la otra, el estudio de la naturaleza, propiedades y transmutaciones de las partículas elementales No obstante, respecto de los problemas que estudian y de los métodos que utilizan en la investigación, estas dos partes de la física tienen muchos puntos comunes

La mayor parte del tiempo vamos a consagrarla a los problemas fundamentales de la física nuclear y sólo al final nos detendremos brevemente en las propiedades de las partículas elementales. Pero antes daremos a conocer los aparatos gracias a los cuales surgió y comenzó a desarrollarse la física del núcleo atómico y de las partículas elementales. Son éstos los aparatos que sirven para registrar y estudiar los choques y las transmutaciones de los núcleos y de las partículas elementales Ellos son precisamente los que proporcionan la información necesaria sobre los sucesos que ocurren en el micromundo.

12.2. Métodos de observación y registro de las partículas elementales

Todo aparato registrador de partículas elementales o de núcleos atómicos en movimiento se asemeja a una escopeta cargada y montada. El pequeño esfuerzo que se hace al apretar el gatillo de la escopeta produce un efecto, incomparable con la fuerza empleada, el disparo

El aparato registrador es un sistema macroscópico más o menos complejo que puede encontrarse en estado inestable Basta una pequeña excitación, debi-

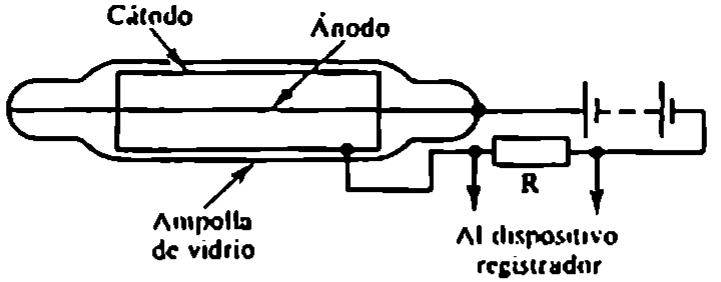


Fig. 239

da al paso de una partícula, para que comience la transición del sistema a un nuevo estado más estable. Este proceso da la posibilidad de registrar la partícula. En la actualidad se utilizan muchos métodos distintos de registro de partículas

En dependencia de los fines del experimento y de las condiciones en que se hace, se utilizan los aparatos más adecuados, que se diferencian entre sí por las características fundamentales

Aquí nos limitaremos a describir los dispositivos que más se emplean en la investigación de las partículas elementales y en la física nuclear. El método más simple de registro, es decir, el de recuento del centelleo, ya se ha estudiado.

CONTADOR DE DESCARGA EN GAS DE GEIGER. El contador de Geiger es uno de los aparatos más importantes para contar automáticamente las partículas

El contador (fig. 239) está formado por un tubo de vidrio recubierto por dentro de una capa metálica (cátodo), y de un delgado filamento metálico que pasa a lo largo del eje del tubo (ánodo) El tubo se llena de gas, por lo general argón. El funcionamiento del contador se basa en la ionización por choque. La partícula cargada (electrón, partícula α, etc.), al pasar por el gas, arranca electrones de los átomos y crea iones positivos y electrones libres. El campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo (a los cuales se aplica una alta tensión) acelera los electrones hasta energías con las cuales empieza la ionización por choque. Se produce una avalancha de iones y la corriente a través del contador crece en flecha. Al mismo tiempo en la resistencia de carga R se genera un impulso de tensión que llega al dispositivo registrador.

Para que el contador pueda registrar la partícula siguiente que incide sobre él hay que extinguir la descarga en avalancha Esto se consigue automáticamente Como en el instante en que aparece el impulso de corriente la caída de tensión en la resistencia de carga R es grande, la tensión entre el ánodo y el cátodo disminuye bruscamente tanto, que la descarga se interrumpe.

El contador de Geiger se utiliza principalmente para registrar electrones y cuantos γ (fotones de gran energía). Pero estos últimos no se pueden registrar directamente, debido a que su poder ionizante es pequeño Para poderlos detectar, la pared interna del tubo se recubre de un material del cual los cuantos γ arrancan electrones.

El contador registra casi todos los electrones que inciden en él y, aproximadamente, uno de cada cien cuantos γ. El registro de partículas pesadas (partículas α, por ejemplo) es más difícil, ya que no es fácil practicar en el contador una "ventanilla" suficientemente estrecha, transparente para estas partículas

En la actualidad existen contadores cuyo funcionamiento se basa en principios distintos que el de Geiger.

CÁMARA DE NIEBLA Los contadores sólo permiten registrar el hecho de que a través de ellos pasan partículas y determinar algunas de sus características. En cambio, en la cámara de niebla (de Wilson), creada en 1912, la partícula cargada rápida deja una trayectoria visible que se puede observar directamente o fotografiarla. Este aparato puede decirse que es una "ventana" abierta al micromundo, es decir, al mundo de las partículas elementales y de los sistemas formados por ellas

El funcionamiento de la cámara de niebla se basa en la condensación del vapor saturado, sobre los iones, formando gotitas de agua. Los iones los crea a lo largo de su recorrido la partícula cargada que pasa.

La cámara de niebla consiste en un recipiente herméticamente cerrado, lleno de vapor de agua o de alcohol, próximo a la saturación (fig. 240). Si el émbolo desciende bruscamente, a causa de una disminución de la presión debajo de él, el vapor que hay en la cámara se expande adiabáticamente Con esto se produce su enfriamiento y el vapor se hace sobresaturado. Este estado del vapor es inestable: el vapor se condensa con facilidad. De centros de condensación sirven los iones que origina en el espacio útil de la cámara la partícula que la atraviesa. Si la partícula penetra en la cámara inmediatamente antes o inmediatamente después de la expansión, a lo largo de su recorrido se forman gotitas de agua. Estas gotitas constituyen la trayectoria visible –"*traza*"– de la partícula lanzada (fig. 241). Luego la cámara retorna a su estado inicial y los iones son expulsados por un campo eléctrico. Antes de la expansión siguiente se quita este campo. En dependencia de las dimensiones de la cámara, el tiempo necesario para restablecer el régimen de trabajo oscila desde varios segundos hasta decenas de minutos

La información que proporcionan las trazas (huellas) en la cámara de niebla es mucho más rica que la que pueden dar los contadores. Por la longitud de la huella se puede determinar la energía de la partícula, y teniéndose al número de gotitas por unidad de longitud de la trayectoria se aprecia su velocidad

Cuanto más larga es la trayectoria de la partícula, tanto mayor es su energía Y cuanto más gotas se forman por unidad de longitud de la trayectoria, tanto

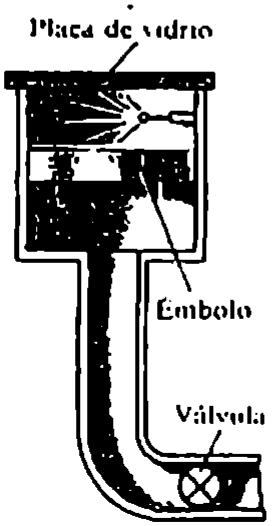


Fig. 240

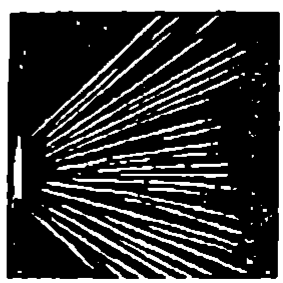


Fig. 241

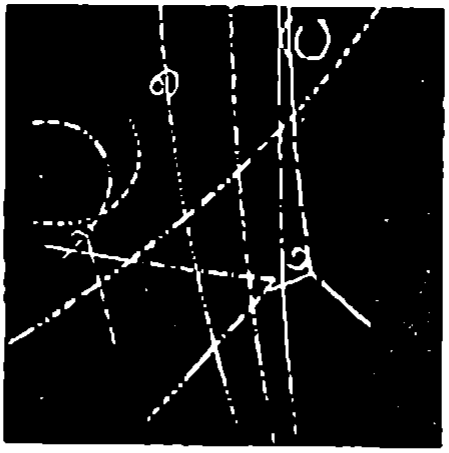


Fig. 242

menor es su velocidad. Las partículas con mayor carga dejan una huella más gruesa.

Los físicos soviéticos P. L. KAPITSA y D. V. SKOBELTSIN propusieron situar la cámara de niebla en un campo magnético homogéneo. El campo magnético actúa sobre las partículas en movimiento con una fuerza determinada (fuerza de Lorentz). Esta fuerza hace que se curve la trayectoria de la partícula sin que varíe el módulo de su velocidad. La curvatura de la trayectoria es tanto mayor cuanto mayor es la carga de la partícula y cuanto menor es su masa. Por la curvatura de la trayectoria se puede determinar la razón de la carga de la partícula a su masa. Si se conoce una de estas magnitudes se puede calcular la otra. Por ejemplo, por la carga de la partícula y la curvatura de la trayectoria se puede hallar su masa.

CÁMARA DE BURBUJAS. En 1952 el científico norteamericano D. GLASER propuso utilizar para poner de manifiesto las huellas de las partículas un líquido recalentado. En este líquido, sobre los iones que se originan durante el movimiento rápido de la partícula cargada, se forman burbujas de vapor que hacen visible la trayectoria. Las cámaras de este tipo recibieron el nombre de *cámaras de burbujas*.

En su estado inicial el líquido se encuentra en la cámara a una presión alta que evita su ebullición, a pesar de que la temperatura del líquido es más alta que la de ebullición a la presión atmosférica. Al reducir la presión con rapidez, el líquido resulta recalentado y durante un corto intervalo de tiempo estará en estado inestable. Las partículas cargadas que atraviesan la cámara durante dicho intervalo hacen que aparezcan trayectorias visibles formadas por burbujas de vapor (fig. 242). Los líquidos que se usan comúnmente son el hidrógeno líquido y el propano. La duración del ciclo de trabajo de la cámara de burbujas es pequeña, de 0,1 s aproximadamente.

La ventaja de la cámara de burbujas frente a la de niebla se debe a que la densidad de su sustancia activa es mayor. Como consecuencia el recorrido de las partículas es suficientemente corto e incluso las partículas con grandes energías se detienen en la cámara. Esto da la posibilidad de observar la serie de transformaciones sucesivas que experimenta la partícula y las reacciones que ella produce.

Las trayectorias visibles en las cámaras de niebla y de burbujas son una de

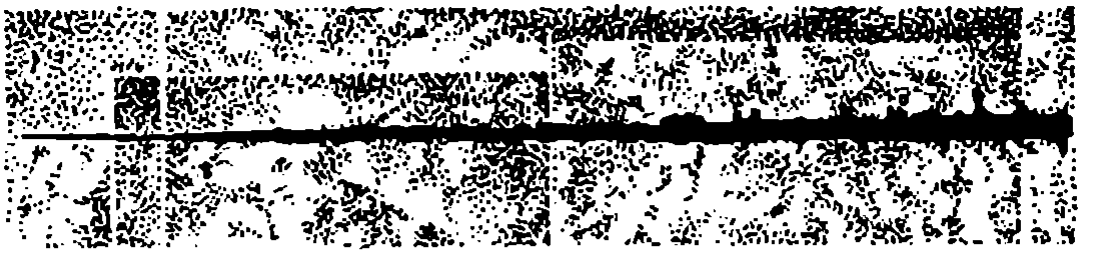


Fig. 243

las fuentes principales de información sobre el comportamiento y las propiedades de las partículas.

La observación de las huellas de las partículas elementales es emocionante, da la sensación de contacto directo con el micromundo.

MÉTODO DE LAS EMULSIONES FOTOGRÁFICAS EN CAPAS GRUESAS. Para registrar las partículas, además de las cámaras de niebla y de burbujas se utilizan las emulsiones fotográficas en capas gruesas. La acción ionizante de las partículas cargadas rápidas en la emulsión de una placa fotográfica permitió al físico francés A. BECQUEREL descubrir en 1896 la radiactividad. El método de la emulsión fotográfica fue desarrollado por los físicos soviéticos L. V. MISOVSKI, A. P. ZHDÁNOV y otros.

La emulsión fotográfica contiene una gran cantidad de cristalitos microscópicos de bromuro de plata. La partícula cargada rápida, penetrando en el cristalito, arranca electrones de algunos átomos de bromo. La cadena de dichos cristalitos forma una imagen latente. Después del revelado en estos cristalitos se reduce la plata metálica y la cadena de granos de plata forma la trayectoria visible de la partícula (fig. 243). Por la longitud y el grosor de la huella se puede apreciar la energía y la masa de la partícula.

A causa de la gran densidad de la emulsión fotográfica, las trayectorias visibles que se obtienen son muy cortas (del orden de 10^{-3} cm para las partículas α que emiten los elementos radiactivos), pero al fotografiarlas se pueden ampliar.

La ventaja de la emulsión fotográfica consiste en la continua acción activa. Esto permite registrar fenómenos poco frecuentes. También tiene importancia que, en virtud de la gran capacidad de frenado de la emulsión fotográfica, aumenta el número de reacciones interesantes que se observan entre las partículas y los núcleos.

12.3. Descubrimiento de la radiactividad

El descubrimiento de la *radiactividad*, fenómeno que demuestra la compleja composición del núcleo atómico, fue puramente casual. Los rayos X, como se recordará, se obtuvieron por primera vez al chocar los electrones rápidos con la pared de vidrio del tubo de descarga. Al mismo tiempo se observó la luminiscencia de las paredes del tubo. Becquerel dedicó mucho tiempo a investigar un fenómeno afín, la luminiscencia de las sustancias expuestas previamente a la luz del Sol. A estas sustancias pertenecen, en particular, las sales de uranio con las cuales hacía sus experimentos Becquerel

Marie Sklodowska - Curie (1867-1934), eminente física y química. Hizo una valiosísima aportación al estudio de la radiactividad. Nació en Polonia. Era hija de un profesor de física. Trabajaba en Francia. Fue la primera mujer que obtuvo el título de Profesora de la Universidad de la Sorbona (París). Junto con su marido P. Curie descubrió los nuevos elementos radiactivos polonio y radio y estudió sus propiedades. Elaboró el método clásico de preparación y análisis de los minerales de uranio, investigó durante varios años las propiedades de las radiaciones radiactivas, su influencia sobre las células vivas, los isótopos radiactivos, etc. Marie Sklodowska - Curie fue galardonada dos veces con el premio Nobel (de física en 1903 y de química en 1911).

Y he aquí que se le plantea la pregunta: después de ser irradiadas las sales de uranio, ¿no emitirán, además de la luz visible, rayos X? Becquerel envolvió una placa fotográfica en papel negro opaco, puso sobre ella unos granos de sal de uranio y la expuso a la clara luz del Sol. Una vez revelada, la placa ennegreció en aquellas partes, sobre las cuales estaban los granos de sal. Por consiguiente, el uranio creaba cierta radiación que, lo mismo que los rayos X, penetra los cuerpos opacos y actúa sobre la placa fotográfica. Becquerel supuso que esta radiación se producía bajo la influencia de los rayos solares. Pero en una ocasión, en febrero de 1896, no pudo hacer el experimento de turno porque el día estaba nublado. Entonces guardó la placa en un cajón de su mesa y puso sobre ella una cruz de cobre recubierta de sal de uranio. Dos días después decidió revelar la placa por si acaso, y descubrió en ella un ennegrecimiento en forma de sombra clara de la cruz. Esto significaba que las sales de uranio espontáneamente, sin intervención de factores externos, crean cierta radiación. Comenzaron las investigaciones intensas. Está claro que sin esta casualidad también hubieran sido descubiertos los fenómenos radiactivos, pero, seguramente, mucho más tarde.

Pronto observó Becquerel que la radiación de las sales de radio ioniza el aire, lo mismo que los rayos X, y descarga el electroscopio. Probando distintos compuestos químicos de uranio, estableció un hecho muy importante: la intensidad de la radiación está determinada solamente por la cantidad de uranio que hay en el preparado y no depende en absoluto de los compuestos en que se encuentra. Por consiguiente, esta propiedad no es particular de los compuestos, sino del elemento químico uranio, de sus ÁTOMOS.

Era natural intentar descubrir si la propiedad de radiar espontáneamente la poseen otros elementos químicos, además del uranio. En 1898 Marie Sklodowska-Curie, en Francia, y otros científicos descubrieron la radiación del torio. Posteriormente los principales esfuerzos en busca de nuevos elementos

radiactivos fueron realizados por Marie Sklodowska-Curie y su marido Pierre Curie. La investigación sistemática de los minerales, contenedores de uranio y torio, permitió separar un nuevo elemento químico, desconocido hasta entonces, el polonio, llamado así en honor de la patria de Marie Sklodowska-Curie, Polonia.

Finalmente se descubrió otro elemento cuya radiación es muy intensa. Este elemento recibió el nombre de radio. El fenómeno de la radiación espontánea fue llamado por el matrimonio Curie *radiactividad*.

El radio tiene una masa atómica relativa igual a 226 y ocupa en la tabla de Mendeléiev la casilla número 88. Hasta su descubrimiento por Curie este puesto estaba vacío. Por sus propiedades químicas el radio pertenece a los elementos alcalinotérreos.

Más tarde quedó establecido que todos los elementos químicos cuyo número de orden es mayor que 83 son radiactivos.

12.4. Rayos alfa, beta y gamma

Después del descubrimiento de los elementos radiactivos empezó a investigarse la naturaleza física de sus radiaciones. Además de Becquerel y del matrimonio Curie, se ocupó de esto Rutherford.

El experimento clásico para descubrir el carácter complejo de la composición de la radiación radiactiva consistía en lo siguiente. El preparado de radio se colocaba en el fondo de un estrecho canal practicado en un trozo de plomo. Enfrente de la entrada del canal se ponía una placa fotográfica. Sobre la radiación que salía de aquél actuaba un campo magnético intenso (fig. 244), perpendicular al rayo. Todo este dispositivo se encontraba en el vacío.

En ausencia del campo magnético, en la placa, una vez revelada, se observaba una mancha oscura exactamente enfrente del canal. En el campo magnético el haz se dividía en tres haces. Dos componentes del flujo inicial se desviaban en sentidos opuestos. Esto indicaba la existencia en estas radiaciones de cargas eléctricas de signos contrarios. La componente negativa de la

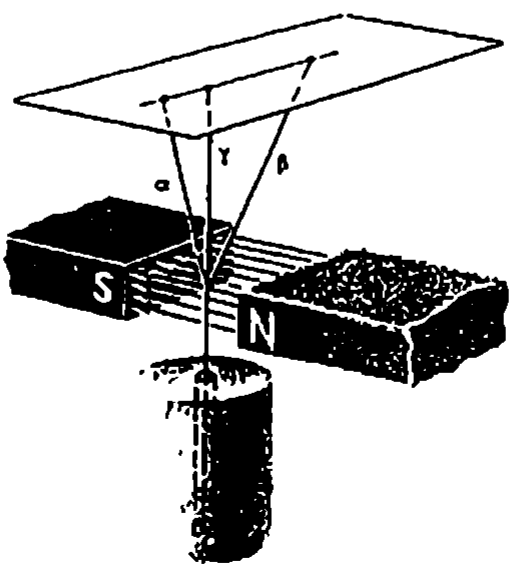


Fig. 244

radiación se desviaba, en el campo magnético, mucho más que la positiva. La tercera componente no sufría desviación en el campo magnético. La componente con carga positiva recibió el nombre de rayos alfa, la de carga negativa, el de rayos beta, y la neutra, el de rayos gamma (rayos α, rayos β y rayos γ).

Estos tres tipos de radiaciones se diferencian mucho entre sí por su poder de penetración o grado de dureza, es decir, por la intensidad con que son absorbidos por las distintas sustancias. Los que tienen menor poder de penetración son los rayos α. Una capa de papel de, aproximadamente, 0,1 mm de espesor es ya opaca para ellos. Si el orificio (canal) del trozo de plomo se tapa con una hoja de papel, en la placa fotográfica no se observará la mancha correspondiente a los rayos α.

Los rayos β son mucho menos absorbidos al pasar a través de la sustancia. Una lámina de aluminio sólo los detiene totalmente si el espesor de la misma es de varios milímetros. Los que tienen mayor poder de penetración son los rayos γ.

La intensidad de la absorción de rayos gamma aumenta a medida que crece el número atómico de la sustancia absorbente. Pero incluso una capa de plomo de 1 cm de espesor no es para ellos un obstáculo infranqueable. Cuando los rayos γ atraviesan dicha capa de plomo su intensidad sólo se reduce a la mitad.

La naturaleza física de los rayos α, β y γ es, evidentemente, distinta.

RAYOS GAMMA. Por sus propiedades los rayos γ se parecen mucho a los rayos X, pero el poder de penetración de los primeros es mucho mayor. Esto indujo a creer que los rayos γ son ondas electromagnéticas. Todas las dudas que sobre esto había desaparecieron una vez que se descubrió la difracción de los rayos γ en los cristales y se midió su longitud de onda. Ésta resultó ser muy pequeña, de 10^{-9} a 10^{-11} cm.

En la escala de las ondas electromagnéticas los rayos γ van inmediatamente después de los rayos X. La velocidad de propagación de los rayos γ es la misma que la de todas las ondas electromagnéticas, cerca de 300 000 km/s.

RAYOS BETA. Desde un principio los rayos α y β fueron considerados como flujos de partículas cargadas. Más fácil resultó organizar experimentos con los rayos β, ya que se desvían mucho tanto en el campo magnético como en el eléctrico.

El problema fundamental consistía en determinar la carga y la masa de las partículas. La investigación de las desviaciones de las partículas β en los campos eléctrico y magnético permitió establecer que estas partículas son electrones que se mueven con una velocidad muy próxima a la de la luz. Conviene indicar que la velocidad de las partículas β que emite un elemento radiactivo dado no son iguales. Se observan partículas con velocidades muy distintas.

PARTÍCULAS ALFA. La naturaleza de las partículas α fue más difícil de establecer, debido a que son desviadas débilmente por los campos magnético y eléctrico.

Este problema consiguió resolverlo definitivamente Rutherford. Para ello midió la razón de la carga q de la partícula a su masa m, por la desviación en el campo magnético. Esta razón resultó ser, aproximadamente, dos veces menor que en el protón o núcleo del átomo de hidrógeno. La carga del protón es igual

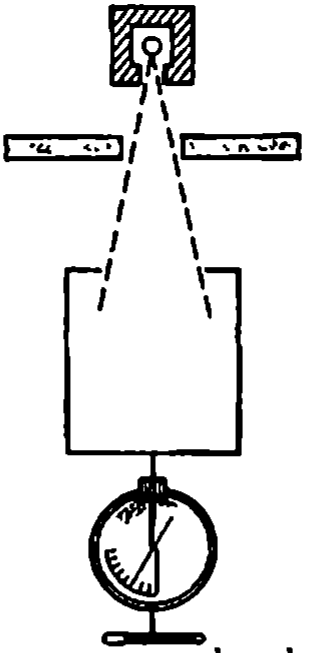


Fig. 245

a la elemental, y su masa se aproxima mucho a la unidad de masa atómica[1]. Por consiguiente, en las partículas α a una carga elemental corresponde una masa igual a dos unidades de masa atómica.

Pero la masa y la carga de la partícula α seguían siendo desconocidas. Era necesario medir la carga o la masa de dicha partícula. Con la aparición del contador de Geiger lo más fácil y seguro era medir la carga. A través de una ventanilla muy estrecha las partículas α pueden penetrar en el contador y ser registradas por él.

Rutherford interpuso en el camino de las partículas α un contador de Geiger, que registraba el número de partículas emitidas por un preparado radiactivo en un tiempo determinado. Después, en lugar del contador, puso un cilindro metálico hueco conectado a un electrómetro sensible (fig. 245). Con el electrómetro midió Rutherford la carga de las partículas α emitidas por la fuente dentro del cilindro en el mismo tiempo (la radiactividad de muchas sustancias casi no varía con el tiempo). Conociendo la carga total de las partículas α y su cantidad, Rutherford determinó la razón de estas magnitudes, es decir, la carga de una partícula. Esta carga resultó ser igual a dos cargas elementales.

De este modo halló Rutherford que en la partícula α a cada una de las dos cargas elementales corresponden dos unidades de masa atómica. Por consiguiente, a las dos cargas elementales corresponden cuatro unidades de masa atómica. Esta misma carga y esta misma masa atómica relativa tiene el núcleo de helio. De esto se sigue que la partícula α es el núcleo del átomo de helio[2].

---

[1] La unidad de masa atómica (u. m. a.) es igual a 1/12 de la masa del átomo de carbono. 1 u. m. a. $\approx 1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ kg.

[2] En aquel tiempo (primer decenio del siglo XX) aún no había sido descubierto el núcleo atómico. Por eso Rutherford decía que era el ion del átomo de helio.

No satisfecho con el resultado obtenido, Rutherford, por medio de experimentos directos, demostró después que durante la desintegración radiactiva α se origina helio. Recogiendo las partículas α en un recipiente especial y reteniéndolas durante varios días, se cercioró, por medio del análisis espectral, de que en este recipiente se acumulaba helio (cada partícula α capturaba dos electrones y se convertía en un átomo de helio)

12.5. Transiciones radiactivas

¿Qué ocurre en la sustancia durante la radiación radiactiva?

A principios del siglo XX era muy difícil responder a esta pregunta. Desde el comienzo de las investigaciones de la radiactividad se pusieron ya de manifiesto muchos fenómenos extraños.

EN PRIMER LUGAR, la sorprendente permanencia con que los elementos radiactivos uranio, torio y radio emiten la radiación. Durante días, meses y años no variaba la intensidad de la radiación. Sobre ella no ejercía influencia alguna el aumento de la temperatura o de la presión. Las reacciones químicas en que participaban las sustancias radiactivas tampoco influían en la intensidad de la radiación.

EN SEGUNDO LUGAR, muy pronto, después del descubrimiento de la radiactividad, se observó que ésta iba acompañada de desprendimiento de energía. Pierre Curie introdujo una ampolla con cloruro de radio en un calorímetro. Este absorbía los rayos α, β y γ y a expensas de su energía se calentaba. Curie halló que 1 g de radio desprende en 1 hora cerca de 582 J de energía. El desprendimiento de energía es continuo durante una serie de años.

¿De dónde procede esta energía, sobre cuyo desprendimiento no ejercen influencia alguna todas las acciones conocidas? Por lo visto, durante la radiación experimenta la sustancia algunos cambios profundos totalmente distintos de las transformaciones químicas ordinarias. Se supuso que las transformaciones las sufren los átomos mismos.

Hoy esta idea no nos sorprende, porque hasta los niños pueden oír hablar sobre ella antes de aprender a leer. Pero a principios del siglo XX dicha idea parecía fantástica y había que tener valor para decidirse a exponerla. En aquel tiempo acababan de obtenerse las demostraciones irrefutables de la existencia de los átomos. La idea de Demócrito sobre la estructura atomística de la sustancia triunfaba por fin al cabo de muchos siglos.

Y he aquí que casi inmediatamente después de esto se pone en duda la inmutabilidad de los átomos. No vamos a describir detalladamente los experimentos que en definitiva llevaron a la completa seguridad de que durante la desintegración radiactiva se produce una cadena de transiciones sucesivas de los átomos. Nos detendremos solamente en los primeros de todos los experimentos, empezados por Rutherford y continuados por él mismo en colaboración con el químico inglés F. SODDY.

Rutherford descubrió que la radiactividad del torio (número de partículas α emitidas en la unidad de tiempo) permanece invariable en una ampolla cerrada. Pero si el preparado se sopla aunque sea con un flujo de aire muy débil, la actividad del torio disminuye mucho.

Esto hizo suponer a Rutherford que, al mismo tiempo que las partículas α, el torio emite cierto gas que también es radiactivo.

Extrayendo el aire de la ampolla en que estaba el torio, Rutherford separó un gas radiactivo y estudió su poder ionizante. Resultó que la actividad de este gas (a diferencia de la del torio, uranio y radio) disminuye muy rápidamente con el tiempo. Cada minuto su actividad se reduce a la mitad y al cabo de diez minutos desaparece prácticamente por completo. Soddy analizó las propiedades químicas de dicho gas y encontró que no reaccionaba químicamente, es decir, que era un gas noble (inerte). Más tarde este gas recibió el nombre de radón y ocupó en la tabla de Mendeléiev el número de orden 86

También experimentan transformaciones otros elementos radiactivos: uranio, actinio, radio, etc. La conclusión general a que llegaron los científicos fue formulada con exactitud por Rutherford: "Los átomos de la sustancia radiactiva están sujetos a modificaciones espontáneas[1]. En cada instante una pequeña parte del número total de átomos se hace inestable y se descompone explosivamente. En la inmensa mayoría de los casos es lanzado con velocidad enorme un fragmento del átomo, una partícula α. En otros casos la explosión va acompañada de la emisión de un electrón rápido y de la aparición de rayos que, lo mismo que los rayos X, tienen gran poder de penetración y se llaman rayos γ.

Se ha observado que como resultado de la transformación atómica se origina una sustancia de tipo completamente nuevo, que se diferencia totalmente de la sustancia inicial por sus propiedades físicas y químicas. Esta nueva sustancia también es inestable y experimenta transformación emitiendo la radiación radiactiva característica[2]

Así se ha establecido con certeza que los átomos de algunos elementos están sujetos a desintegración espontánea, acompañada de emisión de energía en cantidades enormes en comparación con la energía que se libera en las modificaciones moleculares habituales".

Una vez descubierto el núcleo atómico, se comprendió de inmediato que era él precisamente el que sufría las modificaciones en las transformaciones radiactivas. Porque en la capa electrónica del átomo no existe la partícula α, y la disminución del número de electrones de dicha capa por unidad de tiempo convierte el átomo en ion, pero no en un nuevo elemento químico. En cambio, la emisión de un electrón por el núcleo hace que varíe la carga de éste (aumentándola) en una unidad.

Por lo tanto, la radiactividad es la transformación espontánea de unos núcleos en otros, acompañada de la emisión de diversas partículas

LEY DE DESPLAZAMIENTO Las transformaciones de los núcleos se subordinan a la llamada ley de desplazamiento, enunciada por Soddy: durante la desintegración α el núcleo pierde la carga positiva $2e$ y su masa disminuye aproximadamente en cuatro unidades de masa atómica Como resultado el elemento se desplaza dos puestos hacia la izquierda en el sistema periódico. Simbólicamente esto se puede escribir así:

$$^{M}_{Z}X \rightarrow {}^{M-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

---

[1] Del latín *spontaneus*, natural o voluntario.

[2] En realidad también se pueden formar núcleos estables

Aquí el elemento se representa, como en química, por su símbolo convencional, la carga del núcleo se escribe en forma de subíndice a la izquierda del símbolo, y la masa atómica, como supraíndice, también a su izquierda. Por ejemplo, el hidrógeno se representa por el símbolo ${}_1^1\mathrm{H}$. Para la partícula α, que es el núcleo del átomo de helio, se adopta la designación ${}_2^4\mathrm{He}$ y así sucesivamente.

En la desintegración β el núcleo emite un electrón. Como resultado la carga del núcleo aumenta en una unidad y la masa permanece casi invariable

$$ {}_Z^A\mathrm{X} \rightarrow {}_{Z+1}^{A}\mathrm{Y} + {}_{-1}^{0}e $$

Aquí ${}_{-1}^{0}e$ representa el electrón: el supraíndice "0" indica que su masa es muy pequeña comparada con la unidad de masa atómica. Después de la desintegración β el elemento se desplaza un puesto hacia la derecha en el sistema periódico. La radiación gamma no implica variación de la carga, y la masa del núcleo varía en una magnitud insignificante.

La ley de desplazamiento muestra que en la desintegración radiactiva se conserva la carga eléctrica y también, aproximadamente, la masa atómica relativa de los núcleos.

Los nuevos núcleos que surgen de la desintegración radiactiva son, a su vez, por lo general, radiactivos.

12.6. Ley de la desintegración radiactiva. Período de semidesintegración

Rutherford, estudiando las transformaciones de las sustancias radiactivas estableció por vía experimental que su actividad disminuye con el tiempo. De esto se habló en el párrafo anterior. Así, la actividad del radón se reduce a la mitad al cabo de 1 min. La actividad de los elementos como el uranio, torio y radio también disminuye con el tiempo, pero mucho más despacio. Para cada sustancia radiactiva existe un determinado intervalo de tiempo en el transcurso del cual la actividad disminuye dos veces. Este intervalo se llama período de semidesintegración o período medio. El período medio T es el tiempo durante el cual se desintegra la mitad del número efectivo de átomos radiactivos. Porque la reducción a la mitad de la actividad de un preparado se puede conseguir con facilidad dividiéndolo en dos partes iguales.

La disminución de la actividad, es decir, del número de desintegraciones por segundo, en función del tiempo, para uno de los preparados radiactivos se representa en la fig. 246. El período medio de esta sustancia es igual a 5 días.

Hallemos ahora la fórmula matemática de la desintegración radiactiva. Sea N_0 el número de átomos radiactivos presentes en el instante inicial ($t = 0$). Al cabo de un período medio este número será igual a $N_0/2$. Después de otro intervalo de tiempo igual, dicho número se habrá reducido a

$$ \frac{1}{2}\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}. $$

Al cabo de un tiempo $t = nT$, es decir, de n períodos de semidesintegración T,

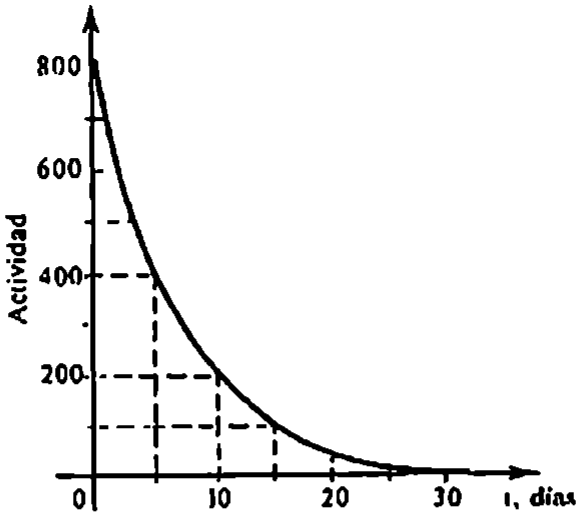


Fig. 246

quedarán

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}$$

átomos radiactivos Pero como

$$n = \frac{t}{T},$$

resulta que

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \qquad (12.1)$$

Ésta es la ley fundamental de la desintegracion radiactiva. Por la fórmula (12.1) se halla el número de átomos no desintegrados que hay en un instante cualquiera.

El período medio es la magnitud fundamental determinante de la velocidad de desintegración radiactiva. Cuanto menor sea el periodo medio tanto menor será el tiempo de vida de los átomos y tanto más rápidamente se producirá la desintegración. Para sustancias diferentes el periodo medio tiene valores muy distintos. Así, el periodo medio del uranio $^{238}_{92}U$ es igual a 4,5 mil millones de años. Precisamente por eso la actividad del uranio no varía apreciablemente en el transcurso de varios años. El periodo medio del radio es mucho menor e igual a 1600 años Por eso la actividad del radio es mucho mayor que la del uranio Hay elementos radiactivos cuyo periodo medio es de millonésimas de segundo

Para hallar el período medio, aplicando la fórmula (12.1), es necesario conocer el número de átomos N_0 que había en el instante inicial y calcular el número N de átomos no desintegrados que quedan al cabo de un intervalo de tiempo t determinado.

La ley de la desintegración radiactiva es bastante simple. Pero comprender el sentido físico de esta ley no es fácil. En efecto, según la ley, durante un intervalo de tiempo cualquiera se desintegra siempre una misma fracción del

número de átomos existentes (durante el período medio, la mitad de los átomos) Esto significa que la velocidad de desintegración no varía con el tiempo. Los átomos radiactivos no "envejecen" Así, los átomos de radón, que surgen durante la desintegración del radio, tienen igual probabilidad de sufrir la desintegración radiactiva tanto inmediatamente después de formarse como al cabo de 10 min. La desintegración de cualquier núcleo atómico no es, por así decirlo, la "muerte por vejez" sino un "accidente" en su vida. Para los átomos radiactivos (o, más exactamente, para sus núcleos) no existe el concepto de edad Sólo puede determinarse su *vida media* τ.

La vida de los átomos aislados puede oscilar desde fracciones de segundo hasta millares de millones de años. Un átomo de uranio, por ejemplo, puede descansar tranquilamente en tierra millares de millones de años y explotar inesperadamente mientras los demás átomos, vecinos suyos, continúan en su estado anterior. La vida media τ es simplemente la media aritmética del período de vida de una cantidad suficientemente grande de átomos de la misma especie. La vida media es directamente proporcional al período de semidesintegración. Puede decirse que

$$\tau \approx 1{,}4\ T \tag{12.2}$$

Es imposible predecir cuándo se producirá la desintegración de un átomo dado. Solo tiene sentido la afirmación referida al comportamiento en promedio de un gran conjunto de átomos. La ley de la desintegración radiactiva determina el NÚMERO MEDIO de átomos que se desintegran en un intervalo de tiempo dado. Pero siempre existen desviaciones inevitables del valor medio, y cuanto menor sea la cantidad de átomos en el preparado, tanto mayores serán estas desviaciones La ley de la desintegración radiactiva es una *ley estadística*. Esta ley es justa en promedio para una gran cantidad de partículas

12.7. Isótopos

El estudio del fenómeno de la radiactividad condujo a un importante descubrimiento, concerniente a la naturaleza de los núcleos atómicos

Como resultado de la observación de un número enorme de transformaciones radiactivas fue esclareciéndose que existen sustancias totalmente idénticas por sus propiedades químicas, pero cuyas propiedades radiactivas son completamente distintas (es decir, que se desintegran de diferente manera). De ningún modo se lograba separar estas sustancias por los procedimientos químicos conocidos. Sobre esta base Soddy expresó en 1911 la suposición de la posible existencia de elementos con propiedades químicas iguales, pero diferentes en otros aspectos, en particular, en su radiactividad Estos elementos deben ocupar un mismo puesto en el sistema periódico de Mendeléiev. Soddy les dio el nombre de *isótopos* (es decir, que ocupan el mismo lugar).

La suposición de Soddy obtuvo una brillante confirmación y una

interpretación profunda un año después, cuando Thomson comenzó las mediciones exactas de la masa de los iones de neón por el método de su desviación en los campos eléctrico y magnético. Thomson descubrió que el neón es una mezcla de dos especies de átomos. La mayor parte de ellos tiene una masa relativa igual a 20. Pero existe una adición insignificante de atomos cuya masa atómica relativa es 22. Como resultado la masa atómica relativa de la mezcla es igual a 20,2. Los átomos, que poseían las mismas propiedades químicas, se diferenciaban por su masa Ambos tipos de neón, como es natural, ocupan el mismo puesto en la tabla de Mendeléiev y, por consiguiente, son isótopos. Así, pues, los isótopos pueden distinguirse no solo por sus propiedades radiactivas, sino también por su masa. Esta última circunstancia resultó ser la principal. Los núcleos atómicos de los isótopos tienen la misma carga Por eso el número de electrones que hay en las capas de los átomos y, por lo tanto, las propiedades químicas de los isótopos son iguales. Pero las masas de los núcleos son diferentes. Estos núcleos pueden ser tanto radiactivos como estables. La diferencia de propiedades radiactivas de los isótopos se debe a que sus núcleos tienen distinta masa.

En la actualidad se sabe que tienen isótopos todos los elementos químicos Algunos elementos sólo tienen isótopos inestables (es decir, radiactivos). Tiene isótopos el más pesado de los elementos que existen en la naturaleza, el uranio (sus masas atómicas relativas son 238, 235 y otras) y el más ligero, el hidrógeno (sus masas atómicas son 1, 2, 3).

Son especialmente interesantes los isótopos del hidrógeno, ya que sus masas atómicas difieren entre sí dos o tres veces. El isótopo del hidrógeno de masa atómica relativa 2 se llama *deuterio* Es estable (o sea, no radiactivo) y forma parte, como pequeña impureza (1 :4500), del hidrógeno ordinario. La combinación del deuterio con el oxígeno da la denominada *agua pesada* Sus propiedades físicas se diferencian apreciablemente de las del agua común. A la presión atmosférica normal hierve a 101,2 °C y se hiela a 3,8 °C

El isótopo del hidrógeno de masa atómica 3 se conoce con el nombre de *tritio*. Es radiactivo β con período medio de cerca de 12 años.

La existencia de los isótopos demuestra que la carga del núcleo atómico no determina todas las propiedades de los átomos, sino únicamente sus propiedades químicas y aquellas físicas que dependen de la periferia de la capa electrónica, como, por ejemplo, las dimensiones. Pero la masa del átomo y sus propiedades radiactivas no vienen determinadas por el número de orden en la tabla de Mendeléiev.

Es interesante que cuando las masas atómicas relativas de los isotopos se midieron con precisión, se puso de manifiesto que se aproximan a números enteros A veces se encuentra una gran desviación de las masas atómicas relativas de los elementos químicos respecto de los números enteros. Así, la masa atómica relativa del cloro es igual a 35,5 Esto significa que, en su estado natural, la sustancia químicamente pura es una mezcla de isótopos en distintas proporciones El que las masas atómicas relativas de los isótopos sean números enteros (aproximadamente) tiene mucha importancia para esclarecer la estructura del núcleo atómico.

12.8. Descubrimiento del neutrón

TRANSFORMACIÓN ARTIFICIAL DE LOS NUCLEOS ATÓMICOS La primera transformación artificial de los núcleos en la historia de la humanidad fue realizada en 1919 por Rutherford Esto no fue ya un descubrimiento casual.

Como el núcleo es muy estable y ni las altas temperaturas, ni la presion, ni los campos electromagnéticos provocan la transformación de los elementos y tampoco influyen en la velocidad de la desintegración radiactiva, supuso Rutherford que para destruir o transformar el núcleo se necesita una energía muy grande. Los portadores de gran energía más a propósito en aquel tiempo eran las partículas α que emiten los núcleos durante la desintegración radiactiva.

El primer núcleo sometido a transformación artificial fue el del átomo de nitrógeno $^{14}_{7}N$ Bombardeando el nitrógeno con partículas α de gran energía, emitidas por el radio, descubrió Rutherford la aparición de protones, es decir, de núcleos de átomos de hidrógeno.

En los primeros experimentos los protones se detectaron por el método del centelleo y los resultados no fueron suficientemente convincentes y seguros. Pero varios años después la transformación del nitrógeno se pudo observar en la cámara de niebla. Aproximadamente, una partícula α, de cada 50 000 emitidas por el preparado radiactivo en la cámara, es capturada por un núcleo de nitrógeno, el cual emite un protón. Al mismo tiempo el núcleo de nitrógeno se transforma en núcleo de un isótopo del oxígeno

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

En la fig. 247 se muestra una de las fotografías de este proceso. A la izquierda se ve la "horquilla" característica, bifurcación de la trayectoria. La huella gruesa pertenece al núcleo de oxígeno, y la delgada, al protón. Las demás partículas α no sufren choques con los núcleos y sus trayectorias son rectilíneas.

Otros investigadores descubrieron las transformaciones, bajo la influencia de las partículas α, de los núcleos del flúor, sodio, aluminio y otros, también acompañadas de emisión de protones' Los núcleos pesados de los elementos

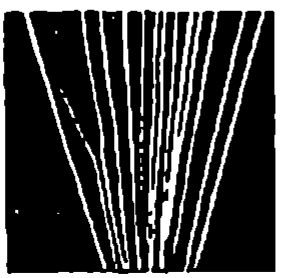


Fig. 247

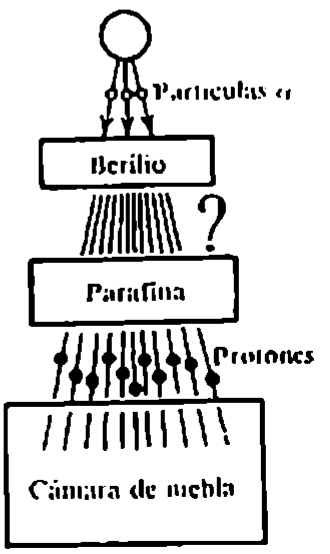


Fig. 248

Frédéric Joliot-Curie (1900-1958), eminente científico y figura social progresista francesa, uno de los fundadores del movimiento internacional de partidarios de la paz. Junto con su esposa Irène descubrió en 1934 la radiactividad artificial. Para el descubrimiento de los neutrones tuvo gran importancia el trabajo del matrimonio Curie acerca de la radiación del berilio sometido a la acción de las partículas α. Frédéric Joliot-Curie con sus colaboradores fueron, en 1939, los primeros en determinar el número medio de neutrones que se desprenden durante la fisión del núcleo del átomo de uranio y en demostrar la posibilidad de la reacción nuclear en cadena con liberación de energía. Estos trabajos se vieron interrumpidos por la guerra

finales del sistema periódico no experimentaban transformaciones. Era evidente que su gran carga eléctrica impedía a las partículas α llegar hasta ellos.

DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN. En 1932 ocurrió un acontecimiento importantísimo para toda la física nuclear. Un discípulo de Rutherford, el físico inglés JAMES CHADWICK, descubrió el neutrón.

Al bombardear el berilio con partículas α no aparecían protones. Pero se observaba una radiación muy penetrante, capaz de atravesar un obstáculo tal como una chapa de plomo de 10 a 20 cm de espesor. Se supuso que serían rayos γ de gran energía. Irene JOLIOT-CURIE (hija de Marie y Pierre Curie) y su marido Frédéric Joliot-Curie descubrieron que si en el camino de esta radiación se interponía una placa de parafina, el poder ionizante de la radiación aumentaba bruscamente. Supusieron con razón que la radiación arrancaba de la placa de parafina los protones que contiene en gran cantidad esta sustancia rica en hidrógeno. Valiéndose de la cámara de niebla (el esquema del experimento se da en la fig. 248) el matrimonio Joliot-Curie descubrió estos protones y, por su alcance, calcularon su energía. Si, de acuerdo con la suposición hecha, los protones se aceleraban a causa del choque con cuantos γ, la energía de estos cuantos debía ser enorme, de cerca de 55 MeV.

Chadwick observó en la cámara de niebla las trayectorias de los núcleos de nitrógeno que habían sufrido el choque con la radiación del berilio. Según su apreciación, la energía de los cuantos γ capaces de comunicar a los núcleos de nitrógeno la velocidad que se observaba en estos experimentos debía ser de 90 MeV. Observaciones análogas de las trayectorias de núcleos de argón en la cámara de niebla llevaron a la conclusión de que la energía de los hipotéticos cuantos γ indicados debía ser de 150 MeV. De este modo, considerando que los núcleos se ponían en movimiento a causa de los choques con partículas exentas de masa en reposo, los investigadores se encontraron ante una clara contradicción: a unos mismos cuantos γ había que atribuirles distintas energías.

Evidentemente la suposición de que el berilio emitía cuantos γ, es decir, partículas exentas de masa en reposo, era inconsistente. Del berilio sometido a la acción de las partículas α salían lanzadas ciertas partículas bastante pesadas. Porque sólo al chocar con partículas pesadas podían los protones o los núcleos de nitrógeno y de argón recibir la gran energía que se observaba. Como dichas partículas tenían un gran poder de penetración y no ionizaban un gas de por sí, debían ser eléctricamente neutras, ya que la interacción de las partículas cargadas con la sustancia es intensa y, por eso, pierden pronto su energía.

La nueva partícula recibió el nombre de *neutrón*. Su existencia la había predicho Rutherford, más de diez años antes de que Chadwick hiciera sus experimentos. Por la energía y el impulso de los núcleos después de chocar con los neutrones, pudo determinarse la masa de éstos. Resultó ser muy poco mayor que la masa del protón, concretamente 1838,6 masas electrónicas en vez de 1836,1 para el protón.

Cuando las partículas α se encuentran con un núcleo de berilio se produce la reacción siguiente:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n.$$

Aquí ${}^{1}_{0}n$ es el símbolo del neutrón; su carga es nula y su masa relativa igual, aproximadamente, a la unidad.

Una reacción semejante se observa también bombardeando con partículas α el boro, quinto elemento del sistema periódico.

¿?

1. ¿Se pueden registrar con la cámara de niebla partículas sin cargas?
2. ¿Qué ventajas tiene la cámara de burbujas frente a la de niebla?
3. ¿Qué leyes de conservación, conocidas por vosotros, se cumplen en las transformaciones radiactivas?
4. Un contador registra las partículas β de un preparado radiactivo, cuya intensidad es muy pequeña. ¿Funcionará el contador a intervalos iguales de tiempo?
5. ¿Existen isótopos de bario cuya masa atómica sea igual a 137,34?
6. Explique por qué, cuando se produce el choque central de un neutrón con un protón, el primero cede toda su energía, mientras que si choca con un núcleo de nitrógeno, solo cede una parte de la misma.

12.9. Estructura del núcleo atómico. Fuerzas nucleares

MODELO DEL NÚCLEO FORMADO POR PROTONES Y NEUTRONES. Después de que en los experimentos de Chadwick fue descubierto el neutrón, el físico soviético D. D. IVANENKO y el científico alemán W. HEISENBERG propusieron, en 1932, el modelo nuclear de protones y neutrones. Este modelo fue confirmado por investigaciones posteriores de las transformaciones nucleares y en la actualidad es indiscutible.

Según dicho modelo, los núcleos están formados por dos tipos de partículas elementales: protones y neutrones.

Como el átomo en conjunto es eléctricamente neutro y la carga del protón es igual al módulo de la carga del electrón, el número de protones que hay en el núcleo es igual al número de electrones que hay en la envoltura del átomo. Por

consiguiente, el número de protones del núcleo es igual al número atómico Z del elemento en la tabla de Mendeléiev.

La suma del número de protones Z y del número de neutrones N que hay en el núcleo se llama número de masa o másico y se designa con la letra A:

$$A = Z + N \tag{12.3}$$

Las masas del protón y del neutrón son aproximadamente iguales y cada una de ellas es más o menos igual a la unidad de masa atómica. La masa de los electrones que hay en el átomo es mucho menor que la masa del núcleo. Por eso el número de masa del núcleo es igual a la masa atómica relativa del elemento redondeada hasta un número entero. Los números de masa se pueden determinar midiendo la masa de los núcleos con aparatos no muy exactos.

Los isótopos son núcleos con el mismo valor de Z, pero con distintos números de masa A, es decir, con distinto número de neutrones N.

FUERZAS NUCLEARES Como los núcleos son bastante estables, los protones y los neutrones tienen que ser mantenidos dentro del núcleo por algunas fuerzas, que deben ser muy grandes. ¿Qué fuerzas son éstas? Puede decirse de antemano que no son gravitatorias, porque éstas son demasiado débiles La estabilidad del núcleo tampoco puede explicarse por las fuerzas electromagnéticas, ya que entre las partículas con carga de igual signo, como son los protones, actúa la repulsión eléctrica Y los neutrones carecen de carga eléctrica.

Es decir, entre las partículas nucleares - protones y neutrones (que con frecuencia reciben el nombre de *nucleones*) - actúan fuerzas especiales. Éstas son las llamadas *fuerzas nucleares* ¿Qué propiedades fundamentales tienen las fuerzas nucleares?

Estas fuerzas son, aproximadamente, 100 veces más intensas que las electromagnéticas. En la naturaleza no existen otras fuerzas más poderosas que estas. Por eso las interacciones de las partículas nucleares suelen llamarse *interacciones fuertes*.

Las interacciones fuertes no se reducen sólo a las de los nucleones en el núcleo Éste es un tipo especial de interacciones propio de la mayoría de las partículas elementales a la vez que las interacciones electromagnéticas.

Otra particularidad importante de las fuerzas nucleares es que actúan a corta distancia Las fuerzas electromagnéticas disminuyen con relativa lentitud a medida que aumenta la distancia. Las nucleares sólo se manifiestan de un modo apreciable a distancias iguales en orden de magnitud a las dimensiones del núcleo (de 10^{-12} a 10^{-13} cm) Esto ya lo demostraron los experimentos de Rutherford sobre la dispersión de las partículas α por los núcleos atómicos. Las fuerzas nucleares son algo así como "hércules de brazos cortos" Aún no existe una teoría cuantitativa acabada de las fuerzas nucleares, aunque durante los últimos 10 ó 15 años se han conseguido importantes éxitos en la construcción de la misma

12.10. Energía de enlace de los núcleos atómicos

Un papel muy importante en toda la física nuclear desempeña el concepto de *energía de enlace del núcleo*

Se entiende por energía de enlace del núcleo la energía necesaria para la DESINTEGRACIÓN TOTAL DEL NUCLEO en nucleones separados. Basándose en la ley de conservación de la energía se puede afirmar también que la energía de enlace es igual a la energía que se desprende al formar el núcleo a partir de las partículas separadas. La energía de enlace de los núcleos atómicos es muy grande. ¿Cómo se puede hallar esta energía?

En la actualidad no es posible calcular la energía de enlace teóricamente, de un modo semejante a como se determina la de los electrones en el átomo. No obstante, la energía de enlace de un átomo cualquiera puede hallarse midiendo con exactitud su masa. En este caso los cálculos correspondientes se hacen aplicando solamente la relación de Einstein entre la masa y la energía:

$$E = mc^2. \tag{12.4}$$

Las medidas exactas de las masas de los núcleos han demostrado que la masa en reposo del núcleo $M_{núc}$ es siempre menor que la suma de las masas en reposo de los protones y neutrones que la constituyen:

$$M_{núc} < Zm_p + Nm_n \tag{12.5}$$

Existe, como suele decirse, un defecto de masa: la diferencia de masa

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{núc}$$

es positiva. En particular, en el helio la masa del núcleo es un 0,75% menor que la suma de las masas de los dos protones y los dos neutrones. Respectivamente, para un mol de helio $\Delta M = 0{,}03$ g.

La disminución de la masa al formarse el núcleo con los nucleones significa que al mismo tiempo disminuye la energía de este sistema de nucleones en la magnitud de la energía de enlace E_{enl}:

$$E_{enl} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{núc})c^2. \tag{12.6}$$

Pero, ¿a dónde van a parar en este caso la energía E_{enl} y la masa ΔM?

Al formarse los núcleos con las partículas, estas últimas, a expensas de la acción de las fuerzas nucleares a distancias pequeñas, se lanzan unas hacia otras con enorme aceleración. Los cuantos γ emitidos en estas condiciones tienen precisamente la energía E_{enl} y la masa

$$\Delta M = \frac{E_{enl}}{c^2}$$

Sobre lo enorme que es la energía de enlace puede dar una idea el ejemplo siguiente: la formación de 4 g de helio va acompañada del desprendimiento de una energía igual a la que produce la combustión de 1,5 ó 2 vagones de carbón de piedra.

Una información importante sobre las propiedades de los núcleos la proporciona la gráfica de la *energía de enlace específica* en función del número de masa A.

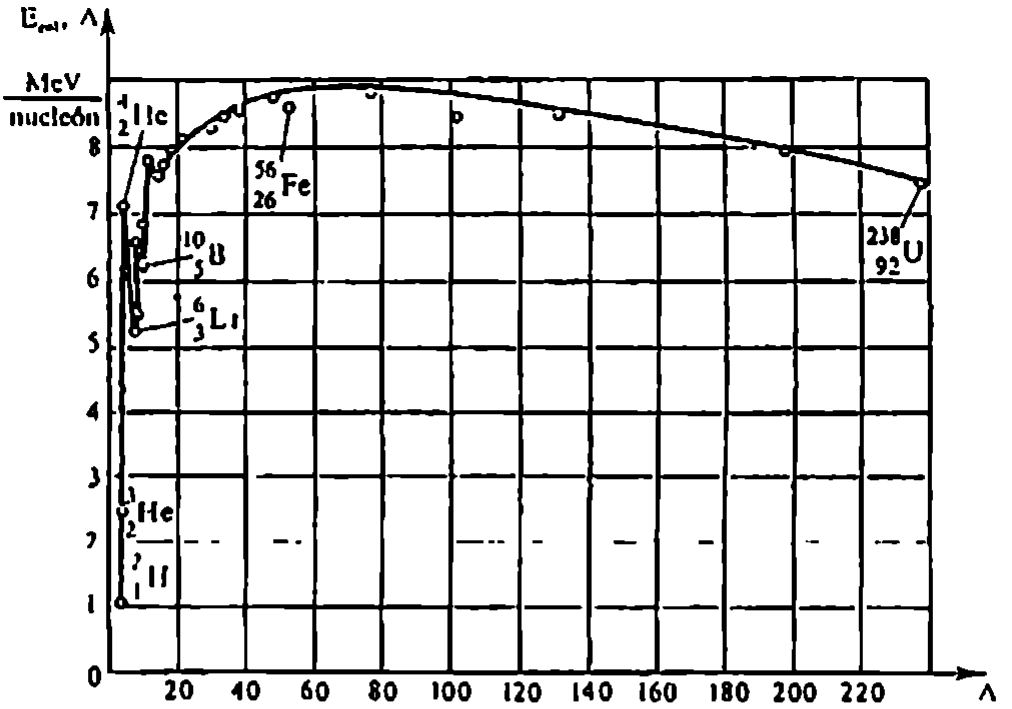


Fig. 249

Se da el nombre de energía de enlace específica a la energía de enlace correspondiente a un nucleón del núcleo. Esta energía se determina por vía experimental.

En la fig 249 se ve bien que exceptuando los núcleos más ligeros, la energía de enlace específica es aproximadamente constante e igual a 8 MeV/nucleón Conviene advertir que la energía de enlace del electrón con el núcleo en el átomo de hidrógeno, igual a la energía de ionización, es casi un millón de veces menor que dicha magnitud.

La curva de la fig. 249 tiene un máximo débilmente expresado. La energía de enlace específica máxima (8,6 MeV/nucleón) la tienen los elementos cuyos números de masa van desde 50 hasta 60, es decir, el hierro y los elementos próximos a él por el número de orden Los núcleos de estos elementos son los más estables.

La disminución de la energía de enlace específica en los elementos ligeros se explica por los efectos superficiales. Los nucleones que se encuentran en la superficie del núcleo interaccionan con un número menor de nucleones vecinos que los que están dentro del mismo, ya que las fuerzas nucleares son de corto alcance Por eso la energía de enlace de los nucleones en la superficie es menor que la de los nucleones dentro del núcleo Cuanto menor sea el núcleo, tanto mayor será la parte del número total de sus nucleones que se encuentre en la superficie. A esto se debe que, en promedio, la energía de enlace por nucleón sea menor en los núcleos ligeros.

En los núcleos pesados la energía de enlace específica disminuye a causa de que, al aumentar Z, crece la energía coulombiana de repulsión de los protones Las fuerzas de Coulomb tienden a romper el núcleo.

12.11. Reacciones nucleares

Se llaman reacciones nucleares las variaciones que experimentan los núcleos atómicos cuando interaccionan con partículas elementales o unos con otros. En el § 12.8 ya se dieron a conocer algunos ejemplos de reacciones nucleares.

Estas reacciones se producen cuando las partículas se aproximan mucho al núcleo y entran en la esfera de acción de las fuerzas nucleares. Las partículas con carga de igual signo se repelen. Por eso la aproximación de las partículas con carga positiva a los núcleos (o de los núcleos entre sí) sólo es posible si a estas partículas (o núcleos) se les comunica una gran energía cinética. Esta energía se transmite a los protones, deuterones, partículas α y otros núcleos más pesados valiéndose de los aceleradores de partículas elementales e iones.

Para efectuar las reacciones nucleares este método es mucho más eficaz que el empleo de los núcleos de helio que emiten los elementos radiactivos. EN PRIMER LUGAR, en los aceleradores se puede comunicar a las partículas energías del orden de 10^8 MeV, es decir, mucho mayores que las que tienen las partículas α (cuya energía máxima es de 9 MeV). EN SEGUNDO LUGAR, se pueden utilizar protones, que en el proceso de la desintegración radiactiva no aparecen (esto es conveniente porque su carga es dos veces menor que la de las partículas α y, por lo tanto, también es dos veces menor la fuerza de repulsión que por parte de los núcleos actúa sobre ellos). EN TERCER LUGAR, se pueden acelerar núcleos más pesados que el de helio.

La primera reacción nuclear con protones rápidos fue efectuada en 1932. En ella se consiguió desintegrar el litio en dos partículas α

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Como se ve en la fotografía de las trayectorias en la cámara de niebla (fig. 250), los núcleos de helio son lanzados en sentidos opuestos a lo largo de una misma recta, de acuerdo con la ley de conservación del impulso (el impulso del protón es mucho menor que el de las partículas α que surgen).

RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE LAS REACCIONES NUCLEARES. En la reacción nuclear que acabamos de describir la energía

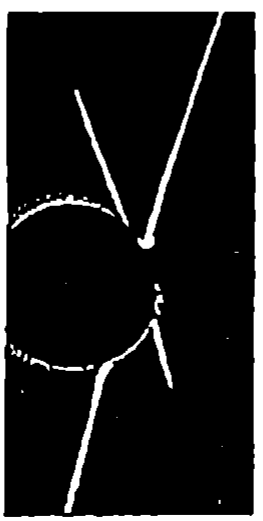


Fig. 250

cinética de los dos núcleos de helio formados resulta ser 7,3 MeV mayor que la energía cinética del protón que interviene en la reacción. La transformación de los núcleos va acompañada de la variación de su energía interna (energía de enlace). En la reacción considerada la energía de enlace específica es mayor en los núcleos de helio que en el núcleo de litio. Por eso parte de la energía interna del núcleo de litio se transforma en energía cinética de las partículas α emitidas.

La variación de la energía de enlace de los núcleos significa que la energía total en reposo de las partículas y los núcleos que intervienen en las reacciones no permanece invariable. En efecto, la energía en reposo del núcleo $M_{núc}c^2$, según la fórmula (12.6), se expresa directamente por medio de la energía de enlace. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, la variación de la energía cinética en el proceso de la reacción nuclear es igual a la variación de la energía en reposo de los núcleos y partículas que intervienen en la reacción.

Se llama rendimiento energético de una reacción nuclear la diferencia entre la energía en reposo de los núcleos y partículas antes de la reacción y después de ella. De acuerdo con lo dicho antes, el rendimiento energético de una reacción nuclear es también igual a la variación de la energía cinética de las partículas que intervienen en la reacción.

Si la energía cinética de los núcleos y las partículas después de la reacción es mayor que antes de ella, se dice que se desprende energía. En el caso contrario la reacción se cumple con absorción de energía. Este tipo de reacción es el que se produce precisamente cuando se bombardea el nitrógeno con partículas α (véase el § 12.8). Una parte de la energía cinética (aproximadamente $1{,}2 \cdot 10^6$ eV) se transforma en el proceso de esta reacción en energía interna del núcleo recién formado.

La energía que se desprende en las reacciones nucleares puede ser enorme. Pero utilizarla efectuando choques de partículas (o núcleos) aceleradas con núcleos-blanco en reposo es prácticamente imposible, porque la mayor parte de las partículas aceleradas pasa junto a los blancos sin producir reacción.

REACCIONES NUCLEARES CON NEUTRONES. El descubrimiento del neutrón marcó un viraje radical en la investigación de las reacciones nucleares. Como los neutrones no tienen carga, penetran sin dificultad en los núcleos atómicos y hacen que éstos se transformen. Por ejemplo, se observa la reacción siguiente:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}\mathrm{Na} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

El gran físico italiano ENRICO FERMI fue el primero que empezó a estudiar las reacciones producidas por los neutrones. El descubrió que las transmutaciones nucleares pueden producirlas no solo los neutrones rápidos, sino también los lentos. En la mayoría de los casos los neutrones lentos son incluso más eficaces que los rápidos. Por eso conviene decelerar previamente los neutrones rápidos. La retardación de los neutrones hasta velocidades térmicas se consigue en el agua ordinaria. Este efecto se explica porque en el agua hay gran número de núcleos de hidrógeno, o protones, cuya masa es casi igual que la de los neutrones. Cuando chocan esferas de igual masa tiene lugar la más intensa transmisión de energía cinética. En el choque central de un

neutrón con un protón en reposo, el neutrón cede al protón toda su energía cinética.

¿ ?

1. ¿Que fuerzas actúan dentro del nucleo?
2. ¿A qué se llama energia de enlace del núcleo? ¿Como se determina la energia de enlace?
3. Explique, usando la fig 249, por qué la reaccion

$$^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$$

transcurre no con absorción de calor, sino con desprendimiento
4. ¿A qué se llama rendimiento energético de una reacción nuclear?
5. ¿Que diferencia fundamental existe entre las reacciones nucleares provocadas por neutrones y las producidas por particulas cargadas?

12.12. Fisión de los núcleos de uranio

Escindirse en partes sólo pueden los nucleos de algunos elementos pesados. Durante la fisión los núcleos emiten dos o tres neutrones y rayos γ. Al mismo tiempo se desprende una gran cantidad de energia.

DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN DEL URANIO. La fisión de los nucleos de uranio fue descubierta en 1938 por los cientificos alemanes O. HAHN y F. STRASSMANN. Éstos establecieron que bombardeando el uranio con neutrones surgen elementos de la parte media del sistema periódico: bario, criptón y otros Sin embargo, la interpretación correcta de este hecho, precisamente como fisión del núcleo de uranio después de capturar un neutrón, fue dada a principios de 1939 por el fisico inglés O. FRISCH en colaboración con el fisico austriaco L. MEITNER.

La fisión del núcleo es posible en virtud de que la masa en reposo del núcleo pesado es mayor que la suma de las masas en reposo de los fragmentos que se producen al escindirse aquél. Por eso se desprende una cantidad de energía equivalente a la disminución de la masa en reposo que acompaña la fisión. Pero la masa total se conserva, ya que la masa de los fragmentos moviéndose a gran velocidad es mayor que su masa en reposo

La posibilidad de la fisión de los núcleos se explica también basándose en la gráfica de la energia de enlace especifica en función del número de masa A (véase la fig. 249). La energía de enlace especifica de los nucleos de los átomos que ocupan en el sistema periódico los últimos puestos ($A \approx 200$) es, aproximadamente, 1 MeV menor que la energia de enlace especifica en los núcleos de los elementos que se encuentran en el centro del sistema periódico ($A \approx 100$). Por eso el proceso de fisión de los núcleos pesados en núcleos de elementos de la parte media del sistema periódico es "conveniente desde el punto de vista energético". Después de la fisión el sistema pasa a un estado en el cual la energia interna es minima. Porque cuanto mayor sea la energía de enlace del núcleo, tanto mayor será la energia que debe desprenderse al formarse los núcleos y, por lo tanto, tanto menor será la energia interna del sistema recién formado

Al escindirse el nucleo la energia de enlace por nucleon aumenta en 1 MeV y la energía total que se desprende debe ser enorme (del orden de 200 MeV). En

Fig. 251

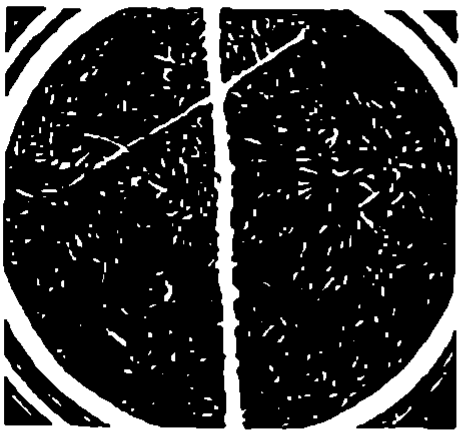
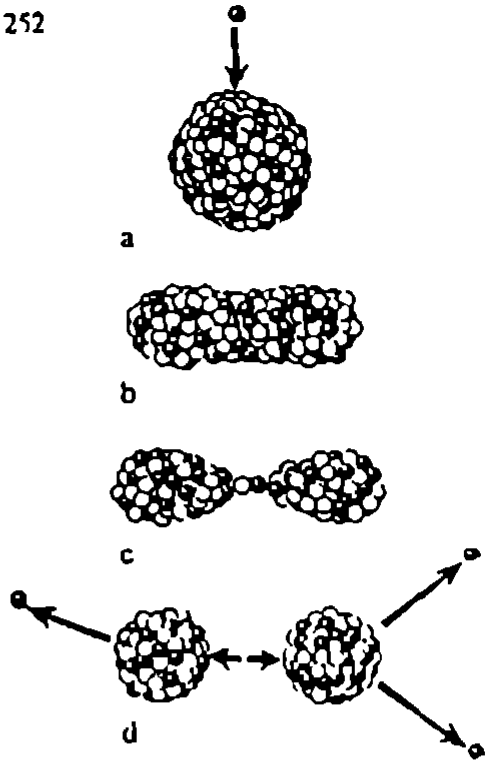


Fig 252



ninguna otra reacción nuclear (que no sea de fisión) se desprenden cantidades de energía tan grandes

Las medidas directas de la energía que se desprende durante la fisión del núcleo de uranio $^{235}_{92}U$ confirmaron los razonamientos antes expuestos y dieron la magnitud de ≈ 200 MeV. La mayor parte de esta energía (168 MeV) corresponde a la energía cinética de los fragmentos. En la fig. 251 se ven las trayectorias de los fragmentos de fisión del uranio en la cámara de niebla

La energía que se desprende durante la fisión del núcleo es de origen electrostático y no nuclear. La gran energía cinética de los fragmentos se debe a su repulsión coulombiana

MECANISMO DE LA FISION NUCLEAR El proceso de la fisión del núcleo del átomo se puede explicar basándose en el modelo nuclear de la gota líquida. Según este modelo, la concentración de nucleones se asemeja a una gotita de líquido cargada (fig. 252, *a*) Las fuerzas nucleares entre los nucleones son de corto alcance, lo mismo que las fuerzas entre las moléculas del líquido. A la vez que las grandes fuerzas de repulsión electrostática entre los protones, que tienden a romper el núcleo, actúan las aún mayores fuerzas nucleares de atracción. Éstas impiden que el núcleo se desintegre.

El núcleo del uranio 235 tiene forma esférica Cuando absorbe un neutrón de más, el núcleo se excita y empieza a deformarse y a adoptar una forma alargada (fig 252, *b*). El núcleo sigue alargándose hasta que las fuerzas de repulsión entre sus dos mitades prevalecen sobre las fuerzas de cohesión que actúan en el cuello (fig. 252, *c*) Después el nucleo se escinde en dos partes (fig 252, *d*). Bajo la acción de las fuerzas de repulsión coulombianas estos fragmentos son lanzados con una velocidad igual a 1/30 de la velocidad de la luz

EMISION DE NEUTRONES DURANTE EL PROCESO DE FISIÓN

Un factor fundamental de la fisión nuclear es la emisión durante dicho proceso de dos a tres neutrones. En virtud de esto precisamente resultó posible la utilización práctica de la energía intranuclear.

El hecho de la emisión de los neutrones libres se puede comprender si se parte de los siguientes razonamientos. Se sabe que la razón del número de neutrones al número de protones en los núcleos estables aumenta a medida que crece el número atómico. Por eso en los fragmentos que resultan de la fisión el número relativo de neutrones es mayor que el permisible para los núcleos de los átomos que se hallan en el centro de la tabla de Mendeléiev. En consecuencia se liberan varios neutrones durante la fisión. Su energía tiene distintos valores, desde varios millones de eV hasta los más pequeños, próximos a cero.

La fisión se produce por lo general en fragmentos de masa diferente. Estos fragmentos son muy radiactivos, porque contienen una cantidad excesiva de neutrones. Como resultado de una serie de desintegraciones β sucesivas se obtienen en definitiva isótopos estables.

Para terminar indicaremos que existe también la *fisión espontánea* de los núcleos de uranio. Ésta fue descubierta por los físicos soviéticos G. N. FLÉROV y K. A. PETRZHAK en 1940. El período medio para la fisión espontánea es igual a 10^{16} años. Esto es dos millones de veces mayor que el período medio para la desintegración α del uranio.

12.13. Reacciones nucleares en cadena

En la fisión del núcleo de uranio se liberan dos o tres neutrones. Esto da la posibilidad de efectuar la *reacción en cadena de fisión del uranio.*

Cualquiera de los neutrones que emite el núcleo en el proceso de fisión puede, a su vez, provocar la fisión del núcleo vecino, que también emite neutrones capaces de originar la fisión siguiente. Como resultado el número de núcleos que se escinden aumenta con mucha rapidez. Se produce la reacción en cadena.

La reacción en cadena va acompañada del desprendimiento de una cantidad enorme de energía. Cada núcleo escindido desprende cerca de 200 MeV. La fisión total de los núcleos que hay en 1 g de uranio produce $2{,}3 \cdot 10^4$ kW·h de energía. Esto equivale a la energía que se obtiene de la combustión de 3 t de carbón ó 2,5 t de petróleo.

Pero la reacción en cadena no puede efectuarse utilizando cualesquiera núcleos, escindibles bajo la influencia de los neutrones. En virtud de una serie de causas, de los núcleos que se encuentran en la naturaleza sólo sirven los del isótopo del uranio cuyo número de masa es 235, es decir, el $^{235}_{92}U$.

ISÓTOPOS DEL URANIO. El uranio natural está formado principalmente por dos isótopos: el $^{235}_{92}U$ el $^{238}_{92}U$. Pero el primero sólo constituye la 1/140 parte del más abundante, que es el $^{238}_{92}U$.

Los núcleos del isótopo $^{235}_{92}U$ se escinden tanto bajo la influencia de los neutrones rápidos como de los lentos. Los núcleos del $^{238}_{92}U$ sólo se escinden por la acción de los neutrones con energías mayores de 1 MeV. Esta energía la tiene, aproximadamente, el 60% de los neutrones que surgen durante la fisión.

Pero, por lo general, solo un neutron de cada cinco hace que se escinda el $^{238}_{92}U$. Los demas neutrones son capturados por este isótopo sin que se produzca su fisión Por lo tanto, la reacción en cadena basada en la utilización del isótopo $^{238}_{92}U$ puro es imposible.

FACTOR DE MULTIPLICACIÓN NEUTRÓNICA. Para que se desarrolle la reacción en cadena no es preciso que cada neutron origine la fisión de un núcleo. Sólo es necesario que el número medio de neutrones liberados en la masa de uranio dada no disminuya con el tiempo.

Esta condición se cumplirá si el *factor de multiplicación neutrónica* k es mayor o igual que la unidad. Se llama factor de multiplicación neutrónica la razón del número de neutrones de cada "generación" al número de neutrones de la "generación" anterior. Se entiende por cambio de generaciones la fisión de núcleos en la cual son absorbidns los neutrones de la "generación" vieja y se generan neutrones nuevos.

Si $k \geq 1$, el número de neutrones aumenta con el tiempo o permanece constante y la reacción en cadena continúa. Cuando $k < 1$, el número de neutrones disminuye y la reacción en cadena es imposible

El factor de multiplicación neutrónica viene determinadu por las cuatro causas siguientes·

1) la captura de neutrones lentos por los núcleos de $^{235}_{92}U$ seguida de la fision y de la captura de neutrones rápidos por los núcleos de $^{235}_{92}U$ y $^{238}_{92}U$, seguida también de fisión,

2) la captura de neutrones por los nucleos de uranio sin que se produzca la fisión;

3) la captura de neutrones por los productos de la fisión, por la sustancia moderadora (de ella se hablará más adelante) y por los elementos estructurales de la instalación.

4) el escape de neutrones de la sustancia fisionable hacia fuera

Sólo el primer proceso va acompañado del crecimiento del número de neutrones (en lo fundamental por cuenta de la fisión del núcleo $^{235}_{92}U$) Los demás procesos son deficitarios La reacción en cadena en el isótopo $^{238}_{92}U$ es imposible, porque en este caso $k < 1$ (el número de neutrones que absorben los núcleos sin escindirse es mayor que el de los que se forman de nuevo a costa de la fisión)

Para que la reaccion en cadena transcurra de un modo estacionario el factor de multiplicación neutrónica debe ser igual a la unidad. Esta igualdad hay que mantenerla con gran exactitud Si $k = 1{,}01$ se produce ya casi instantáneamente la explosión

FORMACIÓN DEL PLUTONIO Tiene mucha importancia la captura de neutrones, sin que se produzca la fisión, por los núcleos del isótopo del uranio $^{238}_{92}U$ Después de la captura se forma el isótopo radiactivo $^{239}_{92}U$, cuyo periodo medio es de 23 min La desintegración transcurre con emisión de un electron y la aparición del primer elemento transuránico, el *neptunio*:

$$^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$$

El neptunio, a su vez, es radiactivo β con periodo medio de cerca de dos dias En el proceso de desintegración del neptunio se forma el elemento

transuránico siguiente, el *plutonio*:

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e$$

El plutonio es relativamente estable, ya que su periodo medio es grande (del orden de 24 000 años). La propiedad más importante del plutonio consiste en que puede escindirse bajo la influencia de los neutrones lentos, lo mismo que el isótopo $^{235}_{92}U$. Por eso con el plutonio también se puede efectuar una reacción en cadena que conlleva el desprendimiento de una enorme cantidad de energía.

12.14. Reactor nuclear

Se llama reactor nuclear (o atómico) el aparato en el cual se efectúa la reacción controlada de fisión de los núcleos.

Los núcleos de uranio, sobre todo los del isótopo $^{235}_{92}U$, son los que más eficazmente capturan neutrones lentos. La probabilidad de la captura de neutrones lentos, seguida de fisión, es centenares de veces mayor que la de los neutrones rápidos. Por eso en los reactores nucleares que funcionan con uranio natural se utilizan moderadores de neutrones para elevar el factor de multiplicación neutrónica. El proceso que tiene lugar en el reactor nuclear se representa esquemáticamente en la fig. 253.

ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE UN REACTOR NUCLEAR En la fig. 254 se da el esquema energético de una instalación con reactor nuclear.

Los elementos fundamentales del reactor nuclear son: el combustible nuclear ($^{235}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$, $^{238}_{92}U$ y otros), el moderador de neutrones (agua pesada o común, grafito y otros), el agente transmisor del calor para extraer la energía

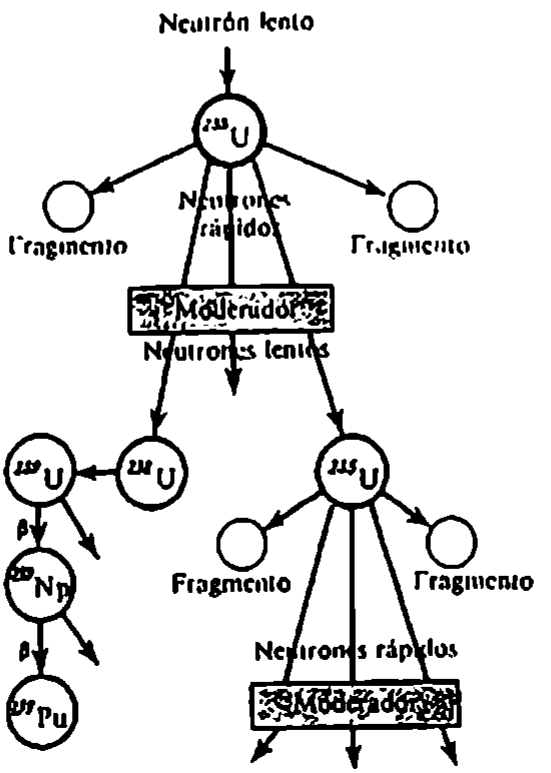


Fig. 253

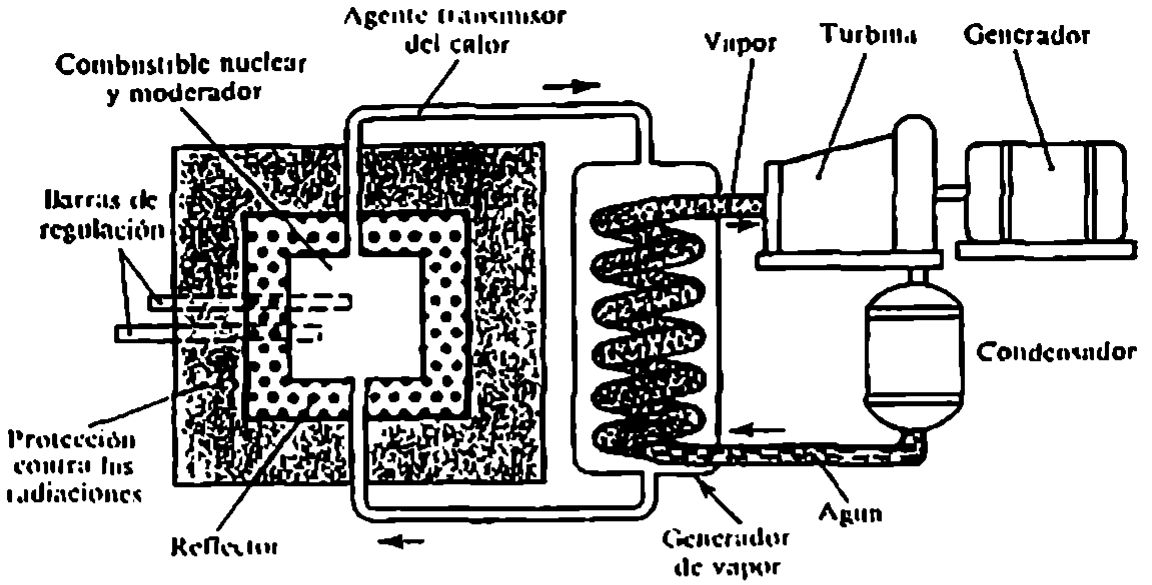


Fig. 254

que se origina durante el funcionamiento del reactor (agua, sodio líquido y otros), y el dispositivo para regular la velocidad de la reacción (barras contenedoras de cadmio o boro, sustancias buenas absorbentes de neutrones, que se introducen en el núcleo del reactor).

Por fuera el reactor se rodea de una envoltura protectora (blindaje) que impide el escape de rayos γ y de neutrones. Esta envoltura es de hormigón armado.

La mejor sustancia moderadora es el *agua pesada* (vease el § 127). El agua común captura neutrones y se convierte en agua pesada. También es buen moderador el grafito, cuyos núcleos no absorben neutrones.

MASA CRÍTICA. El factor de multiplicación k puede hacerse igual a la unidad solamente si las dimensiones del reactor y, respectivamente, la masa de uranio, superan cierto valor crítico. *Se llama masa crítica la cantidad mínima de material fisionable con la cual puede transcurrir la reacción nuclear en cadena.*

Si las dimensiones son pequeñas, el escape de neutrones a través de la superficie de la zona activa del reactor (en la cual se encuentran las barras con el uranio) es demasiado grande.

A medida que se aumentan las dimensiones del sistema, el número de núcleos que participan en la fisión crece proporcionalmente al volumen, mientras que el número de neutrones que se pierden a causa del escape aumenta proporcionalmente al área de la superficie. Por eso, aumentando el sistema, se puede conseguir un valor del factor de multiplicación $k \geqslant 1$. El sistema tendrá las dimensiones críticas si el número de neutrones que se pierden a causa de su captura y del escape es igual al número de neutrones que se obtienen en el proceso de fisión. En este caso $k = 1$. Las dimensiones críticas y, respectivamente, la masa crítica, vienen determinadas por el tipo de combustible nuclear, por el moderador y por las peculiaridades estructurales del reactor.

Para el uranio $^{235}_{92}U$ puro (sin moderador) en forma de esfera, la masa crítica

Enrico Fermi (1901–1954), eminente físico italiano. Hizo una gran aportación al desarrollo de la física teórica y experimental moderna. En 1938 emigró a EE.UU. Creó, al mismo tiempo que Dirac, la teoría cuántica estadística de los electrones y de otras partículas (estadística de Fermi–Dirac) Construyó la teoría cuantitativa de la desintegración β, prototipo de la teoría cuántica moderna de la interacción de las partículas elementales Hizo una serie de descubrimientos fundamentales en la física neutrónica, descubrió la radiactividad artificial producida por la irradiación de una sustancia con neutrones, el frenado de los neutrones lentos, y otros inventos. Bajo la dirección de Fermi, en 1942, fue realizada por primera vez la reacción nuclear controlada

es aproximadamente igual a 50 kg. El radio de la esfera es entonces igual a ~9 cm (el uranio es una sustancia muy pesada). Utilizando moderadores de neutrones y una envoltura de berilio reflectora de ellos, se ha conseguido disminuir la masa crítica hasta 250 g.

El control del reactor se efectúa por medio de barras que contienen cadmio o boro Cuando estas barras están fuera del núcleo del reactor $k > 1$, y cuando están totalmente dentro de él, $k < 1$. Haciendo entrar las barras en el núcleo activo se puede detener en cualquier instante la reacción en cadena.

REACTORES DE NEUTRONES RAPIDOS Se han construido reactores de neutrones rápidos sin moderador. Como la probabilidad de la fisión provocada por los neutrones rápidos es pequeña, estos reactores no pueden funcionar con uranio natural La reacción sólo se puede mantener en una mezcla enriquecida que contiene, por lo menos, un 15% de isótopo $^{235}_{92}U$. La ventaja de los reactores de neutrones rápidos consiste en que durante su funcionamiento se forma una cantidad importante de plutonio, que luego se utiliza como combustible nuclear. Estos reactores se llaman *reproductores*, porque reproducen el material fisionable. Se construyen reactores con *relación de reproducción* hasta 1,5, Esto significa que en el reactor, al escindirse 1 kg de isótopo $^{235}_{92}U$ se obtiene hasta 1,5 kg de plutonio.

En los reactores corrientes la relación de reproducción llega a 0,6 ó 0,7

PRIMEROS REACTORES NUCLEARES. La reacción de fisión en cadena del uranio fue realizada por primera vez en EE UU. La llevó a cabo un grupo de científicos dirigido por ENRICO FERMI en diciembre de 1942

En la Unión Soviética el primer reactor nuclear fue puesto a punto el 25 de diciembre de 1946 por una colectividad de físicos encabezada por el destacado científico Igor Vasílievich KURCHÁTOV.

Igor Vasilievich Kurchatov (1903 1960), eminente físico y organizador científico soviético, tres veces héroe del trabajo socialista. Desde 1943 encabezó los trabajos científicos relacionados con el problema atómico. Bajo su dirección fue creado el primer reactor nuclear de Europa (1946) y la primera bomba atómica soviética (1949).
Los primeros trabajos de Kurchatov estuvieron dedicados a la investigación de los dieléctricos (ferroeléctricos), de las reacciones nucleares producidas por los neutrones y de la radiactividad artificial. Descubrió la isomería de los isótopos radiactivos artificiales, es decir, la existencia de estados excitados de los núcleos con período de vida relativamente grande.

En la actualidad existen varios tipos de reactores que difieren entre sí tanto por su potencia como por el fin a que se destinan. Los que ofrecen mejores perspectivas son los reactores de neutrones rápidos reproductores.

12.15. Reacciones termonucleares

La masa en reposo del núcleo de uranio es mayor que la suma de las masas en reposo de los fragmentos en que dicho núcleo se escinde. En los núcleos ligeros esta cuestión se plantea al revés. Así, la masa en reposo del núcleo de helio es mucho menor que la suma de las masas en reposo de los dos núcleos de hidrógeno pesado, en que puede escindirse el núcleo de aquél.

Esto significa que cuando se funden núcleos ligeros la masa en reposo disminuye y, por consiguiente, debe desprenderse una gran cantidad de energía. Este tipo de reacciones de fusión de núcleos ligeros sólo puede transcurrir a temperaturas muy altas. Por eso reciben el nombre de *termonucleares*.

Reacciones termonucleares son las reacciones de fusión de núcleos ligeros a temperaturas muy altas.

Para la fusión de los núcleos es necesario que éstos se aproximen entre sí a una distancia de cerca de 10^{-12} cm, es decir, que entren en la esfera de acción de las fuerzas nucleares. A este acercamiento se opone la repulsión coulombiana de los núcleos, que sólo puede ser vencida a expensas de una gran energía cinética del movimiento térmico de los núcleos.

La energía que se desprende en las reacciones termonucleares, referida a un nucleón, es mayor que la energía específica que se desprende en las reacciones de fisión en cadena de los núcleos. Así, al fundirse el hidrógeno pesado (*deuterio*)

con el isótopo superpesado del hidrógeno (*tritio*), se desprenden cerca de 3,5 MeV por nucleón. En la fisión del uranio, en cambio, sólo se desprende, aproximadamente, 1 MeV de energía por nucleón.

Las reacciones termonucleares desempeñan el papel decisivo en la evolución del Universo. La energía que irradian el Sol y las estrellas es de origen termonuclear.

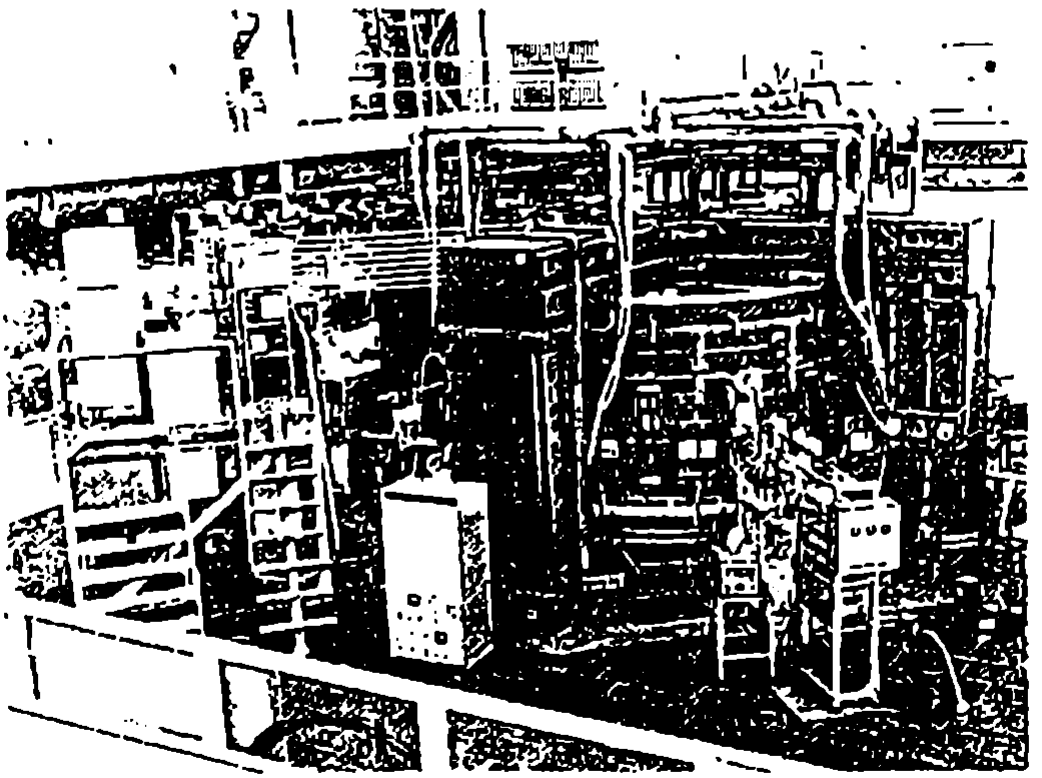
Según las ideas modernas, en su estado temprano de desarrollo una estrella está constituida principalmente por hidrógeno. La temperatura dentro de la estrella es tan grande que en ella tienen lugar reacciones de fusión de los protones y de formación de helio. Después, al fundirse los núcleos de helio se forman los elementos más pesados. Todas estas reacciones van acompañadas de un desprendimiento de energía que asegura la radiación de luz por las estrellas durante millares de millones de años.

La realización de las *reacciones termonucleares controladas* en la Tierra ofrece a la humanidad una nueva fuente de energía prácticamente inagotable. La reacción más esperanzadora en este sentido es la de fusión del deuterio con el tritio

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n$$

En esta reacción se desprenden 17,6 MeV de energía. Como el tritio no existe en la naturaleza, debe ser producido en el mismo reactor termonuclear a partir del litio.

Desde el punto de vista económico esta reacción puede ser ventajosa, según



Instalación experimental Tokamak-10 destinada a investigar las condiciones en que se han de realizar las reacciones termonucleares controladas.

los cálculos, únicamente si las sustancias que reaccionan se calientan hasta temperaturas del orden de centenares de millones de grados, siendo grande la densidad de aquéllas (de 10^{14} a 10^{15} partículas por 1 cm^3). Estas temperaturas pueden conseguirse en principio creando en el plasma potentes descargas eléctricas. El principal obstáculo en este camino es tener que confinar el plasma a esta temperatura tan alta, dentro de la instalación, durante un tiempo igual a 0,1 ... 1 s

Para esto no sirve ningún tipo de paredes, ya que a estas temperaturas se convertirían en vapor inmediatamente. El único método posible de confinar el plasma de alta temperatura en un espacio limitado es el de los campos magnéticos muy intensos. Pero hasta ahora no se ha logrado resolver este problema a causa de la inestabilidad del plasma. La inestabilidad hace que las partículas cargadas se dispersen a través de las "paredes" magnéticas.

Hoy se tiene la seguridad de que dentro de los 10 o 20 años próximos se conseguirá crear los reactores termonucleares. Los científicos soviéticos son los que han logrado mayores éxitos en la creación de reacciones termonucleares controladas. Estos trabajos se comenzaron bajo la dirección de los académicos L. A. ARTSIMOVICH y M. A. LEONTÓVICH y los continúan discípulos suyos.

Por ahora sólo se ha conseguido realizar la *reacción de síntesis no controlada* de tipo explosivo en la bomba de hidrógeno (o termonuclear).

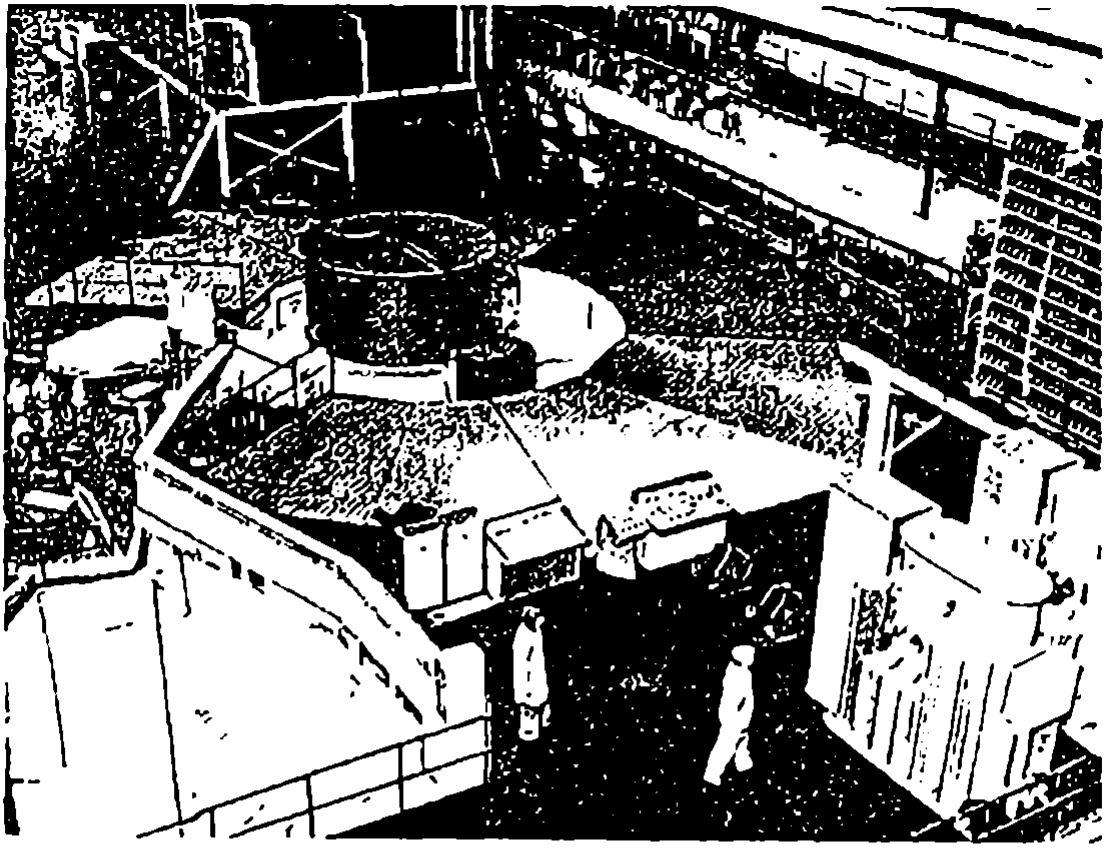
12.16. Utilización de la energía nuclear

LOGROS Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE LA ENERGÉTICA NUCLEAR EN LA URSS. El empleo de la energía nuclear para transformarla en eléctrica se llevó a cabo por primera vez en la URSS en 1954. En la ciudad de Obninsk empezó a funcionar la primera central eléctrica atómica (CEA), cuya potencia era de 5000 kW. La energía desprendida en el reactor nuclear se utilizó para transformar agua en vapor, el cual, a su vez, hacía girar una turbina acoplada a un generador.

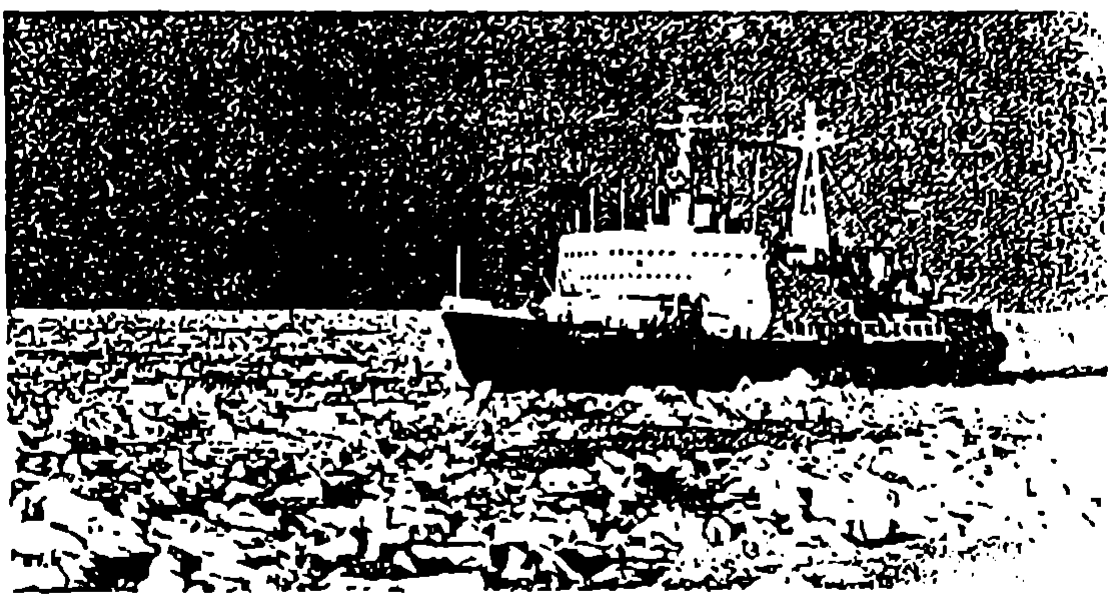
Por este mismo principio funcionan hoy las CEA inauguradas durante los últimos veinte años, la Novovoronézhskaya, las de Leningrado, Kursk, Chernobil y península de Kola. Los reactores de estas centrales tienen de 500 a 1000 MW de potencia.

Está en vías de cumplimiento el plan de construcción de CEA preferentemente en la parte europea del país. Esto se explica por las ventajas que tienen las CEA en comparación con las centrales eléctricas térmicas, que funcionan con combustible orgánico. Los reactores nucleares no consumen combustible orgánico deficitario ni recargan los ferrocarriles con transportes de carbón. Las centrales eléctricas atómicas no gastan oxígeno atmosférico ni ensucian el medio con cenizas y productos de combustión. Estas ventajas tienen especial importancia en la parte europea de la URSS, donde los recursos hidroenergéticos y de combustible orgánico son insuficientes para asegurar el crecimiento necesario de la potencia energética.

En los reactores de neutrones lentos (térmicos) sólo se aprovecha el 1 ó 2 por ciento del uranio. La utilización total de este se logra en los reactores de neutrones rápidos, en los cuales se produce al mismo tiempo nuevo combustible nuclear, en forma de plutonio. En 1980, en la CEA Beloyárskaya empezó



Reactor atómico de neutrones rápidos, de 600 MW de potencia instalado en la central eléctrica atómica Bielovárskaya cerca de Sverdlovsk



El primer rompehielos atómico del mundo, el "Lenin", en los hielos del Oceano Glaciar Artico

a funcionar el primer reactor del mundo de neutrones rápidos de 600 MW de potencia.

En adelante la construcción en la URSS de CEA tipo, de 4000 a 6000 MW, se hará en serie y su potencia total en la primera etapa del cumplimiento del plan deberá alcanzar 100 GW

ARMA NUCLEAR. La reacción en cadena no controlada, con gran factor de multiplicación neutrónico, se efectuó en la bomba atómica.

Para que el desprendimiento de energía sea casi instantáneo (explosión), la reacción debe efectuarse con neutrones rápidos (sin moderador). De material explosivo sirve el uranio puro $^{235}_{92}U$ o el plutonio $^{239}_{94}Pu$.

La explosión sólo puede producirse si las dimensiones del material fisionable son mayores que las críticas. Esto se consigue juntando rápidamente dos trozos de material fisionable de dimensiones menores que la crítica, o comprimiendo un trozo hasta tales dimensiones con las cuales el escape de neutrones a través de la superficie disminuya tanto que las dimensiones del trozo resulten superiores a las críticas. Lo uno y lo otro se realiza por medio de materiales explosivos ordinarios

Cuando la bomba hace explosión la temperatura alcanza millones de kélvines. A esta temperatura la presión aumenta bruscamente y se origina una onda explosiva de gran potencia. Al mismo tiempo se produce una irradiación muy intensa Los productos de la reacción en cadena que se liberan al explotar la bomba son muy radiactivos y peligrosos para los organismos vivos

Los EE.UU. utilizaron bombas atómicas contra Japón al final de la segunda guerra mundial En 1945 fueron lanzadas éstas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki Estos actos de destrucción en masa de seres humanos no fueron dictados por necesidades militares, puesto que en aquel tiempo la capitulación del Japón era ya inminente.

En la bomba termonuclear (de hidrógeno) sirve de fuente de la alta temperatura necesaria para la síntesis termonuclear la explosión de una bomba atómica (de uranio o plutonio) colocada dentro de ella. Las posibilidades técnicas de aumentar la energía de la explosión de estas bombas no tienen límite alguno

12.17. Obtención de isótopos radiactivos y sus aplicaciones

ELEMENTOS INEXISTENTES EN LA NATURALEZA

Como ya se ha dicho, por medio de las reacciones nucleares se han obtenido isótopos radiactivos de todos los elementos químicos, que sólo existen en la naturaleza en estado estable. Los elementos cuyos números son 43, 61, 85 y 87 carecen totalmente de isótopos estables y fueron obtenidos por primera vez artificialmente. Así, por ejemplo, el elemento con número de orden $Z = 43$, denominado *tecnecio*, tiene el isótopo de vida más larga, con período de semidesintegración de cerca de un millón de años.

Valiéndose de las reacciones nucleares y de la radiactividad artificial se han conseguido también los elementos transuránicos El *neptunio* y el *plutonio* se han dado ya a conocer. Además de ellos se han obtenido los elementos

siguientes. *americio* ($Z = 95$), *curio* ($Z = 96$), *berquelio* ($Z = 97$), *californio* ($Z = 98$), *einstenio* ($Z = 99$), *fermio* ($Z = 100$), *mendelevio* ($Z = 101$), *nobelio* ($Z = 102$), *laurencio* ($Z = 103$), *kurchatovio* ($Z = 104$) y *nielsbohrio* ($Z = 105$). El kurchatovio, el nielsbohrio y los elementos 106 y 107, que hasta ahora no tienen nombre, fueron sintetizados por primera vez en los laboratorios de Dubna, en la URSS

ÁTOMOS MARCADOS. En la actualidad tiene cada vez más importancia, tanto en la ciencia como en la industria, el empleo de isótopos radiactivos de distintos elementos químicos. El método más importante es el de los átomos marcados o trazadores. Este método se basa en que las propiedades químicas de los isótopos radiactivos no se diferencian de las propiedades de los isótopos no radiactivos de los mismos elementos.

Los isótopos radiactivos son muy fáciles de detectar por su radiación. La radiactividad es una marca particular con ayuda de la cual se puede observar el comportamiento del elemento en las diversas reacciones químicas y en las transformaciones físicas de las sustancias. Este método se ha convertido en uno de los más eficaces para resolver gran número de problemas de biología, fisiología, medicina, etc. Con él se ha podido esclarecer una serie de cuestiones que por otros métodos es poco probable que hubieran podido resolverse.

LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS COMO FUENTE DE RADIACIÓN. Los isótopos radiactivos se utilizan mucho en la ciencia, en la medicina y en la técnica como fuentes compactas de radiación de gran energía. Principalmente se utiliza el cobalto radiactivo $^{60}_{27}Co$ y otros isótopos en calidad de fuentes de rayos γ.

OBTENCIÓN DE LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS. Los isótopos radiactivos se preparan en los reactores nucleares y en los aceleradores de partículas elementales. En la actualidad una gran rama de la industria se dedica a producir isótopos. En toda la industria atómica lo que quizá tenga más valor para la humanidad es la obtención y utilización de los isótopos radiactivos.

LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS EN BIOLOGÍA Y MEDICINA. Una de las investigaciones más importantes hechas con ayuda de átomos marcados fue el ESTUDIO DEL METABOLISMO. Con él se demostró que el organismo está sujeto a una renovación casi total en períodos de tiempo relativamente pequeños. Los átomos que lo componen son sustituidos por otros nuevos.

El hierro, como demostró la investigación isotópica de la sangre, constituye la única excepción a dicha regla. Éste entra en la composición de la hemoglobina de los glóbulos rojos. La introducción de átomos radiactivos de hierro $^{59}_{26}Fe$ en los alimentos puso de manifiesto que estos átomos casi no se incorporan a la sangre. Únicamente cuando las reservas de hierro del organismo se están agotando, dicho elemento empieza a ser asimilado.

Los átomos trazadores también se utilizan mucho en la agronomía. Por ejemplo, para determinar cuál de los abonos fosfatados es mejor asimilado por las plantas, se marcan los fertilizantes con fósforo radiactivo $^{32}_{15}P$. Sometiendo las plantas a investigación radiactiva se puede hallar la cantidad de fósforo asimilado por ellas de las diferentes clases de abonos.

En aquellos casos en que no existen isótopos radiactivos de vida suficientemente larga, como, por ejemplo, en el oxígeno y en el nitrógeno, se cambia la composición isotópica de los elementos estables. Así, añadiendo al

oxígeno un exceso de isótopo $^{18}_{8}O$ se estableció que el oxígeno libre, que se desprende por fotosíntesis, es el que antes estaba en la composición del agua, y no en la del anhídrido carbónico.

Los isótopos radiactivos se utilizan en MEDICINA tanto para la diagnosis como con fines terapéuticos.

El sodio radiactivo inyectado en pequeñas cantidades en la sangre se emplea para estudiar la circulación de ésta.

El yodo se deposita intensamente en la glándula tiroides, sobre todo en caso de hipertiroidismo o enfermedad de Basedow. Observando con un contador de partículas cómo se deposita el yodo radiactivo, se puede hacer rápidamente el diagnóstico. Grandes dosis de yodo radiactivo provocan la destrucción parcial de los tejidos que se desarrollan de modo anómalo. Por eso el yodo radiactivo se utiliza para curar la enfermedad de Basedow.

La intensa radiación γ del cobalto se utiliza para curar enfermedades cancerosas (bomba de isótopos de cobalto).

LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS EN LA INDUSTRIA La utilización de los isótopos radiactivos en la industria no es menos amplia. Uno de los ejemplos de esto puede ser el siguiente procedimiento para controlar el desgaste de los segmentos de los émbolos en los motores de combustión interna Irradiando los segmentos con neutrones se provocan en ellos reacciones nucleares y se hacen radiactivos Al funcionar el motor las partículas que se desprenden de los segmentos van a parar al aceite lubricante Analizando el nivel de radiactividad de dicho aceite al cabo de cierto tiempo de estar funcionando el motor, se halla el desgaste de los segmentos

Los isótopos radiactivos permiten formarse una idea de la difusión de los metales, de los procesos que tienen lugar en los altos hornos, etc La potente radiación γ de los preparados radiactivos se utiliza para investigar la estructura interna de las piezas metálicas de fundición con el fin de detectar los defectos que tengan

LOS ISOTOPOS RADIACTIVOS EN LA AGRICULTURA Los isótopos radiactivos se emplean cada vez más en la agricultura. La irradiación de las semillas (del algodón, de la berza, de los rábanos, etc.) con pequeñas dosis de rayos γ de preparados radiactivos hace que aumente notablemente la cosecha

Las dosis grandes de radiación provocan mutaciones en las plantas y en los microorganismos, lo que en algunos casos hace que aparezcan variedades con nuevas propiedades valiosas (radioselección). Así se han obtenido nuevas especies de trigo, habichuelas y otros cultivos y microorganismos muy productivos con destino a la industria de antibióticos. También se emplean los rayos γ de los isótopos radiactivos para combatir los insectos perniciosos y para conservar productos alimenticios.

LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS EN LA ARQUEOLOGIA. Para determinar la edad de objetos antiguos de procedencia orgánica (maderas, carbón vegetal, tejidos u otros semejantes) se aplica el método del carbono radiactivo En los vegetales existe siempre el isótopo radiactivo β del carbono $^{14}_{6}C$, cuyo periodo de semidesintegración $T = 5700$ años Este isótopo se forma, en pequeña cantidad, en la atmósfera terrestre por la acción de los neutrones sobre el nitrógeno Los neutrones proceden de las reacciones nucleares que

provocan las partículas rápidas que llegan del cosmos (rayos cósmicos) a la atmósfera. El carbono radiactivo, combinándose con el oxígeno, forma anhídrido carbónico, el cual es absorbido por los vegetales y, al alimentarse con ellos, ingerido por los animales. Un gramo de carbono de las muestras de un bosque joven emite alrededor de quince partículas β por segundo.

Cuando el organismo muere deja de reponer su carbono radiactivo. Pero la cantidad de este isótopo que existe en él va disminuyendo a causa de la radiactividad. Determinando el contenido, en tanto por ciento, de carbono radiactivo que hay en los restos orgánicos se puede hallar su edad, si se encuentra entre los límites de 1000 a 50 000, e incluso hasta 100 000 años. Por este procedimiento se ha podido conocer la edad de las momias egipcias, de los restos de hogueras prehistóricas, etc.

12.18. Acción biológica de las radiaciones radiactivas

La radiación de las sustancias radiactivas ejerce una acción muy intensa sobre los organismos vivos. Una irradiación relativamente débil, que al ser absorbida totalmente sólo eleve la temperatura del cuerpo 0,001 °C, altera ya la actividad vital de las células.

La célula viva es un mecanismo complejo incapaz de proseguir su actividad normal incluso si algunas de sus partes sufren pequeños daños. Hasta las irradiaciones débiles son capaces de causar importantes daños a las células y acarrear enfermedades peligrosas (síndrome radiactivo). Si la irradiación es muy intensa mata a los organismos vivos. La peligrosidad de las radiaciones se agrava porque no producen sensaciones dolorosas ni aún en el caso de dosis letales.

El mecanismo de acción de las radiaciones que afecta los objetos biológicos no ha sido aún suficientemente estudiado. Pero está claro que se reduce a la ionización de los átomos y las moléculas y esto hace que cambie su actividad química. Las células más sensibles a la radiación de los núcleos son aquellas que se dividen con más frecuencia. Por eso las radiaciones afectan en primer lugar la médula de los huesos, por lo que se altera el proceso de formación de la sangre. También son afectadas las células del aparato digestivo y de otros órganos.

La irradiación influye mucho en la herencia. En la mayoría de los casos esta influencia es negativa.

Pero en algunos casos la irradiación de los organismos vivos puede ser provechosa. Las células de los tumores malignos (cancerosos) se multiplican con rapidez y por eso son más sensibles a la irradiación que las normales. En esto se basa el tratamiento de los tumores cancerosos con los rayos γ de preparados radiactivos, que para este fin son más eficaces que los rayos X.

DOSIS DE RADIACIÓN. La acción de las radiaciones sobre los organismos vivos se caracteriza por la dosis de radiación. *Se llama dosis de exposición a la radiación D_e la medida de la ionización del aire que se produce bajo la acción de una radiación dada.* En el SI la dosis de radiación se mide EN CULOMBIOS POR KILOGRAMO (C/kg).

Si la carga total de los iones de un mismo signo formados por la radiación en 1 kg de aire es igual a 1 C, la dosis de radiación es igual a 1 C/kg

La acción que ejercen sobre el organismo las radiaciones de distinta naturaleza, a igualdad de la dosis D_0, no es la misma. Por eso para apreciar la peligrosidad de una radiación se introduce el factor K de actividad biológica relativa. Para los rayos X, γ y los electrones, $K = 1$; para los neutrones lentos $K = 5$, para los neutrones rápidos y las partículas α, $K = 10$ y así sucesivamente. En la práctica lo más importante es conocer la llamada *dosis biológica de irradiación* D_b, que se determina como sigue:

$$D_b = KD_0$$

El fondo natural de radiaciones (rayos cósmicos, radiactividad del medio ambiente y del cuerpo humano) constituye una dosis biológica anual de cerca de $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ C/kg. La Comisión internacional de defensa radiactiva ha establecido para los individuos que trabajan con radiaciones la dosis anual máxima permisible de $1{,}3\ 10^{-3}$ C/kg. Una dosis biológica de 0,15 C/kg percibida durante un corto espacio de tiempo es mortal.

PROTECCIÓN DE LOS ORGANISMOS CONTRA LA RADIACION. Cuando se trabaja con una fuente de radiaciones cualquiera (isótopos radiactivos, reactores, etc.) hay que tomar medidas de seguridad para proteger a todo el personal que pueda encontrarse en la zona de acción de las radiaciones.

La medida de seguridad más fácil es alejar el personal de la fuente de radiación una distancia suficientemente grande. Incluso sin tener en cuenta su absorción por el aire, la intensidad de la radiación disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia hasta la fuente. Por eso las ampollas que contienen preparados radiactivos no deben cogerse con la mano. Para esto se deben utilizar pinzas especiales de mango largo.

En aquellos casos en que no es posible un alejamiento suficiente del foco de radiación se emplean como defensas barreras de materiales absorbentes.

La protección contra los rayos γ y los neutrones es más difícil a causa de su gran penetrabilidad. El mejor absorbente de rayos γ es el plomo. El boro y el cadmio absorben bien los neutrones lentos. Los neutrones rápidos se frenan previamente utilizando grafito.

¿ ?

1. ¿De qué depende el valor del factor de multiplicación neutrónica?
2. ¿Para qué se emplean en el reactor nuclear los moderadores de neutrones?
3. ¿Qué es la masa crítica?
4. ¿Por qué la reacción de fusión de los núcleos ligeros solo se produce a temperaturas muy altas?
5. ¿Cómo se explica, desde el punto de vista de la ley de conservación de la energía, el que se desprenda energía tanto en caso de fisión de núcleos pesados, como cuando se funden núcleos ligeros?
6. ¿Qué son los átomos marcados y cómo se utilizan?
7. ¿A qué se llama dosis de radiación?

Ejercicio 14

1. Como resultado de una serie sucesiva de desintegraciones radiactivas el uranio $^{238}_{92}U$ se transforma en plomo $^{206}_{82}Pb$. ¿Cuántas transiciones α y cuántas transiciones β experimenta?
2. El período de semidesintegración del radio T = 1600 años. ¿A qué es igual la vida media del núcleo de radio?
3. ¿Cuántas veces disminuye el número de átomos de uno de los isótopos

del radón en 1,91 días? El período medio de este isótopo del radón $T = 3{,}82$ días

4. Utilizando la tabla de Mendeleiev, determinar el número de protones y de neutrones que hay en los núcleos de flúor, argón, bromo, cesio y oro

5. ¿A qué es igual la energía de enlace del núcleo de hidrógeno pesado (deuterón)? La masa atómica relativa del deuterón $m_D = 2{,}0141$, la del protón, $m_p = 1{,}00728$ y la del neutrón $m_n = 1{,}00866$; la masa del átomo de carbono $m_c = 1{,}995 \cdot 10^{-26}$ kg

6. Bombardeando núcleos de boro $^{11}_{5}B$ con protones se obtiene berilio $^{8}_{4}Be$. ¿Qué otro núcleo se forma en esta reacción?

7. Como resultado de la fisión del núcleo $^{235}_{92}U$ por captura de un neutrón se forman los núcleos $^{142}_{56}Ba$ y $^{91}_{36}Kr$ y tres neutrones libres. La energía de enlace específica de los núcleos de bario es 8,38 MeV, la de los de criptón, 8,55 MeV y la de los de uranio 7,59 MeV. ¿A qué es igual la energía que se desprende durante la fisión de un núcleo de uranio?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 12

La física nuclear estudia la estructura y las transformaciones de los núcleos.

Para registrar y estudiar los choques y las transmutaciones de los núcleos atómicos y de las partículas elementales se utilizan aparatos especiales. Entre ellos figuran el contador de Geiger, la cámara de niebla, la cámara de burbujas y las emulsiones fotográficas.

A finales del siglo pasado A. BECQUEREL descubrió el fenómeno de la radiactividad. Elementos químicos como el uranio, el torio y otros emiten espontáneamente (sin influencia exterior) rayos α, β y γ. La naturaleza de estos rayos es distinta: los rayos γ son ondas electromagnéticas de pequeña longitud (de 10^{-8} a 10^{-11} cm); los rayos β son flujos de electrones, y los rayos α, flujos de núcleos de átomos de helio.

Rutherford estableció que la desintegración radiactiva es una transformación espontánea de los núcleos atómicos acompañada de la emisión de diversas partículas. Según la ley de la desintegración radiactiva, para cada sustancia radiactiva existe un intervalo de tiempo determinado durante el cual su actividad se reduce a la mitad. Este intervalo de tiempo se llama período de semidesintegración o período medio. En dependencia de la sustancia, el período medio varía dentro de límites muy amplios: desde millares de millones de años hasta fracciones de segundo.

Rutherford fue el primero en efectuar la transformación artificial de núcleos atómicos, bombardeándolos con partículas α emitidas por sustancias radiactivas. J. Chadwick, haciendo experimentos semejantes, descubrió una nueva partícula elemental, el neutrón. La carga del neutrón es nula y su masa es aproximadamente igual que la del protón (sólo la supera en una cantidad insignificante).

El físico alemán W. HEISENBERG, e independientemente de él el físico soviético D. D. IVANENKO, propusieron el modelo de núcleo atómico de protones y neutrones. De acuerdo con este modelo, el núcleo está formado por protones y neutrones. El número de masa A del núcleo es igual a la suma del

número de protones Z y el número de neutrones N.

$$A = Z + N$$

Los núcleos que tienen el mismo número de protones Z pero diferente número de neutrones N se llaman isótopos. Sus propiedades químicas son idénticas. Los protones y los neutrones son retenidos en el núcleo por poderosas fuerzas de corto alcance. Estas fuerzas se llaman nucleares.

Un concepto importantísimo para toda la física nuclear es el de energía de enlace. La energía de enlace E_{enl} es igual a la energía necesaria para dividir el núcleo en nucleones independientes:

$$E_{enl} = (Zm_p + Nm_n - M_{nuc})c^2,$$

donde m_p, m_n y M_{nuc} son, respectivamente, las masas en reposo del protón, del neutrón y del núcleo. La energía de enlace de los núcleos es millones de veces mayor que la energía de ionización de los átomos.

Los cambios que experimentan los núcleos, cuando interaccionan entre sí (o con las partículas elementales), se llaman reacciones nucleares. En estas reacciones se produce desprendimiento o absorción de energía. La energía cinética de los núcleos y de las partículas, que son productos de la reacción nuclear, puede ser distinta de la energía cinética de los mismos iniciales, debido a que al transformarse los núcleos varía su energía interna.

La mayoría de las reacciones nucleares se observa cuando los núcleos chocan con partículas elementales cargadas o con núcleos ligeros de gran energía. Esta energía la adquieren en los aceleradores de partículas elementales o de iones. Los neutrones no son repelidos por los núcleos y por eso pueden provocar reacciones nucleares aunque sus energías sean pequeñas.

Los núcleos de uranio, torio y otros elementos pesados pueden escindirse bajo la acción de los neutrones. En este caso en cada acto de fisión se desprende una energía del orden de 200 MeV. Los núcleos, al escindirse, emiten dos o tres neutrones. Esto da la posibilidad de efectuar la reacción en cadena, controlada, en los reactores nucleares. La reacción de fisión de los núcleos no controlada se utiliza en la bomba atómica.

Cuando chocan átomos ligeros, éstos pueden fundirse con desprendimiento de energía. Estas reacciones nucleares sólo pueden producirse a altas temperaturas y, por eso, reciben el nombre de termonucleares. A expensas de las reacciones termonucleares, el Sol y las estrellas emiten energía durante millares de millones de años. Reacciones termonucleares no controladas se efectúan en la bomba de hidrógeno.

La primera central eléctrica atómica del mundo fue construida en la URSS. En este mismo país se desarrolla impetuosamente la construcción de centrales eléctricas nucleares de gran potencia, sobre todo en su parte europea, donde los recursos de combustible orgánico son limitados. La reacción termonuclear controlada no se ha conseguido todavía.

Los isótopos radiactivos, preparados con ayuda de los reactores nucleares y de los aceleradores de partículas elementales, se emplean mucho en la ciencia, en la medicina, en la agricultura y en la industria.

Las radiaciones radiactivas son muy peligrosas para los organismos vivos. Cuando se trabaja con ellas es necesario tomar medidas de seguridad especiales.

13 PARTÍCULAS ELEMENTALES

13.1. ¿Qué es una particula elemental?

Durante el curso de física se ha hablado en varias ocasiones de la existencia en la naturaleza de partículas llamadas *elementales*. De ellas ya son más o menos conocidas el electrón, el fotón, el protón y el neutrón. Pero, ¿qué es una partícula elemental?

Cuando el filósofo griego DEMÓCRITO llamó átomos a las partículas más simples, indivisibles (se recordará que la palabra griega ÁTOMO significa INDIVISIBLE), probablemente le parecía todo, en principio, no muy complejo. Los diversos objetos, las plantas y los animales están constituidos por partículas invariables e indivisibles. Las transformaciones que se observan en el mundo son simples transposiciones de los átomos. En el mundo todo fluye y cambia, excepto los mismos átomos, que permanecen inmutables.

Pero a finales del siglo XIX se descubrió la estructura compleja de los átomos y fue introducido el electrón como parte componente del átomo. Más tarde, ya en el siglo XX, fueron descubiertos el protón y el neutrón, partículas que entran en la composición del núcleo atómico. Al principio todas estas partículas fueron consideradas exactamente del mismo modo que Demócrito consideró los átomos: se suponían indivisibles y primeras entes inmutables, ladrillos fundamentales del universo.

Sin embargo, la situación de atrayente claridad duró poco. Todo resultó ser mucho más complicado, se puso de manifiesto que no existen partículas invariables. La propia palabra *elemental* tiene doble sentido. Por una parte, ELEMENTAL significa sin duda lo más simple. Por otra, se entiende por elemental algo que es fundamental, que sirve de base a las cosas (precisamente en este sentido ahora las *partículas subatómicas*[1] se denominan elementales).

Considerar que las partículas elementales que hoy conocemos son semejantes a los átomos invariables de Demócrito es imposible por el simple hecho siguiente. Ninguna de las partículas es inmortal. La mayoría de las partículas, llamadas ahora elementales, no puede vivir más de dos millonésimas de segundo, incluso en ausencia de acción exterior alguna. El neutrón libre (es decir, fuera del núcleo atómico) tiene una vida media de 15 min.

Únicamente el fotón, el electrón, el protón y el neutrino conservarían su invariabilidad, si cada una de estas partículas fuera sola en todo el mundo.

Pero los electrones y los protones tienen unos compañeros muy peligrosos, los positrones y los antiprotones, al chocar con los cuales estas partículas se destruyen mutuamente y se forman otras nuevas.

---

[1] *Partículas subatómicas* son aquellas con las cuales están formados los átomos.

El fotón emitido por la lámpara de mesa no tiene más de 10^{-8} s de vida Éste es el tiempo que necesita para llegar a la página del libro y ser absorbido por el papel.

Solamente el neutrino es casi inmortal, debido a que sus interacciones con otras partículas son extraordinariamente débiles. Pero también él perece cuando se encuentra con ellas, aunque estas colisiones son extremadamente raras.

Así, pues, en su búsqueda de lo inmutable en nuestro mundo variable, los científicos se han encontrado no con una "base granítica", sino con "arena movediza"

Todas las partículas elementales se transforman unas en otras y estas transformaciones mutuas son el hecho principal de su existencia

La idea de la invariabilidad de las partículas elementales resultó ser inconsistente Pero la de su indivisibilidad se conserva.

Las partículas elementales no se pueden dividir más, pero por sus propiedades son inagotables. El carácter inagotable de las propiedades del electron fue indicado por V I Lenin inmediatamente después del descubrimiento de aquél

He aquí lo que hace pensar así. Supongamos que se nos plantea el deseo natural de investigar, por ejemplo, si el electrón está formado por otras *partículas subelementales*[1]. ¿Qué hay que hacer para intentar dividir el electrón? Sólo es concebible un procedimiento. El mismo que utiliza un niño cuando quiere saber lo que hay dentro de un juguete de plástico, darle un golpe fuerte.

Como es natural, al electrón no se le puede dar un martillazo En vez de esto hay que utilizar otro electrón lanzado a enorme velocidad o cualquier otra partícula elemental que se mueva a gran velocidad

Los aceleradores modernos comunican a las partículas cargadas una velocidad cercana a la de la luz.

¿Qué ocurre cuando chocan partículas de energía ultraalta? Estas partículas no se dividen en algo que pueda llamarse sus partes componentes Generan nuevas partículas de las que ya figuran en la lista de las partículas elementales Cuanto mayor es la energía de las partículas que chocan, tanto mayor es la cantidad de las que se generan y mayor su peso. Esto es posible en virtud de que al aumentar la velocidad crece la masa de las partículas De un solo par de partículas cualesquiera con masa acrecentada se pueden obtener, en principio, todas las partículas conocidas hasta hoy.

En la fig. 255 se ve el resultado del choque de un núcleo de carbono, de 60 GeV de energía (raya gruesa superior), con un núcleo de plata de la emulsión fotográfica El núcleo se rompe en fragmentos que salen lanzados en sentidos distintos Al mismo tiempo se forman muchas partículas elementales nuevas, piones. Reacciones semejantes a ésta, por choque con núcleos relativistas obtenidos en un acelerador, se efectuaron por primera vez en el mundo, en 1976, en el laboratorio de altas energías del Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares de Dubná, en la URSS, bajo la dirección del académico A. M. BALDIN. Los núcleos exentos de envoltura electrónica se obtuvieron ionizando los átomos de carbono con un rayo láser.

---

[1] Se sobrentiende que son las partículas con las cuales estarían formadas las elementales que hoy se conocen

Fig. 255

Es posible que en los choques de partículas, con energías hasta ahora inalcanzadas, se generen algunas partículas nuevas aún desconocidas. Pero esto no cambia la esencia de la cuestión. Las nuevas partículas que se formen en los choques no pueden ser consideradas como partes componentes de las partículas "precursoras", ya que las partículas "hijas", si se aceleran, pueden, sin cambiar de naturaleza, sólo con aumentar su masa, generar a su vez por choque varias partículas exactamente iguales a las que fueron sus "progenitoras" y muchas otras al mismo tiempo

Según las ideas modernas, son partículas elementales las partículas primarias, indivisibles, de que está constituida toda la materia Pero la indivisibilidad de las partículas elementales no significa que carezcan de estructura interna (de esta cuestión se tratará al final del capítulo).

13.2. Descubrimiento del positrón. Antipartículas

La existencia del sosia o doble del electrón, *positrón*, fue predicha teóricamente por el físico inglés P. DIRACK en 1931. Al mismo tiempo predijo que si un positrón y un electrón se encuentran, ambas partículas DESAPARECEN (se *aniquilan*) engendrando fotones de gran energía También puede ocurrir el proceso inverso, la FORMACIÓN del *par electrón–positrón*, por ejemplo, al chocar un fotón de energía suficientemente grande (su masa debe ser mayor que la suma de las masas en reposo de las partículas que nacen) con un núcleo

Dos años después fue descubierto el positrón por medio de una cámara de niebla situada en un campo magnético. La dirección en que se desviaba la trayectoria de la partícula indicaba el signo de su carga. Por el radio de curvatura y la energía de la partícula se determinó la relación de su carga a su masa. La magnitud de esta relación resultó ser la misma que en el caso del electrón. En la fig. 256 se ve la primera fotografía demostradora de la existencia del positrón. La partícula iba de abajo a arriba y, después de atravesar una placa de

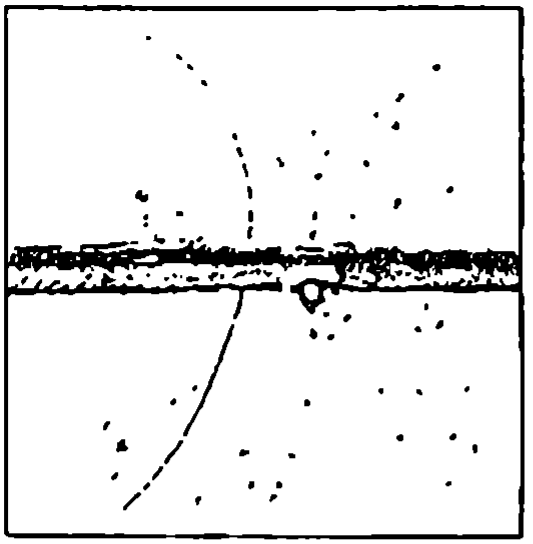


Fig. 256

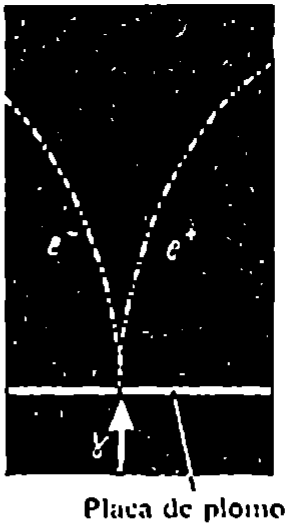


Fig. 257

plomo, perdió parte de su energía. Por eso la curvatura de su trayectoria aumentó.

El proceso de formación de un par electrón – positrón por un cuanto γ en una placa de plomo se ve en la fotografía de la fig. 257. En la cámara de niebla sometida al campo magnético el par deja la huella característica en forma de bifurcación arqueada.

La desaparición de unas partículas y la aparición de otras en las reacciones entre partículas elementales es precisamente una transformación y no una simple combinación nueva de las partes componentes de las antiguas partículas. Esto se observa con especial claridad en la aniquilación de los *pares electrón – positrón*. Ambas partículas tienen una masa en reposo determinada y cargas eléctricas. Los fotones que se forman carecen de carga y de masa en reposo, ya que no pueden existir en estado de reposo.

En su tiempo el descubrimiento de la formación y aniquilación de los pares electrón – positrón produjo verdadera sensación en la ciencia. Hasta entonces nadie había supuesto que el electrón, la más antigua de las partículas y principalísimo material de construcción de los átomos podía no ser eterno. Más tarde se hallaron sosias o dobles – antipartículas – de todas las partículas. Las antipartículas se contraponen a las partículas porque al encontrarse una partícula cualquiera con la antipartícula correspondiente se produce su aniquilación. Ambas partículas desaparecen, transformándose en cuantos de radiación o en otras partículas.

Es relativamente reciente el descubrimiento del antiprotón y el antineutrón. La carga eléctrica del antiprotón es negativa. Ahora se sabe bien que la formación de los *pares partícula – antipartícula* y su aniquilación no es una propiedad exclusiva de los electrones y positrones.

Los átomos cuyos núcleos están constituidos por antinucleones y su envoltura por positrones, forman la antimateria. En 1969 se obtuvo en la URSS por primera vez en el mundo, el *antihelio*.

Cuando la antimateria y la materia se aniquilan, la energía en reposo (véase

el § 8 7) se transforma en energía cinética de las partículas de radiación que se forman.

La energía en reposo es el depósito más grande y concentrado de energía del Universo

Esta energía sólo se libera totalmente durante la aniquilación, convirtiéndose en otras formas de la energía. Por eso la antimateria es la fuente de energía más moderna, el combustible de más calorías. Hoy es difícil predecir si la humanidad será capaz alguna vez de utilizar este "combustible".

13.3. Desintegración del neutrón. Descubrimiento del neutrino

NATURALEZA DE LA DESINTEGRACIÓN β. Durante la desintegración β del núcleo salen electrones. Pero en el núcleo no los hay. ¿De dónde proceden entonces? Una vez emitido el electrón por el núcleo, la carga de este y, por consiguiente, el número de protones, aumenta una unidad. El número de masa del núcleo no varía. Por lo tanto, el número de neutrones disminuye una unidad. Esto significa que dentro de los núcleos radiactivos β el neutrón es capaz de desintegrarse en un protón y un electrón. El protón queda en el núcleo, y el electrón sale para afuera. Los neutrones sólo son estables en los núcleos estables.

Pero he aquí una cosa extraña. Núcleos totalmente idénticos emiten electrones de distinta energía. Y los núcleos que se forman en este caso son también idénticos, independientemente de cual fuera la energía del electrón emitido. Esto, al parecer, contradice la ley de conservación de la energía, la más fundamental de las leyes de la física. Resulta que la energía del núcleo inicial no es igual a la suma de las energías del núcleo final y del electrón.

HIPÓTESIS DE PAULI. El físico suizo W. PAULI supuso que, a la vez que el protón y el electrón, al desintegrarse el neutrón se forma cierta partícula "invisible" que se lleva la energía que falta. Esta partícula no la registran los aparatos porque no es portadora de carga eléctrica. Esto quiere decir que es incapaz de ionizar átomos y desintegrar núcleos, o sea, que no puede causar efectos por los cuales pueda juzgarse sobre su aparición.

Claro que sería absurdo afirmar que una partícula, por muy insólita que sea, no interacciona absolutamente con nada. Lo contrario sería introducir esta partícula en la física para disimular la renuncia a la ley de conservación de la energía. Significaría que la energía, junto con la partícula, desaparece irremediablemente y para siempre. Por eso supuso Pauli que la hipotética partícula simplemente reacciona de una forma muy débil con la sustancia y por eso puede pasar a través de un gran espesor de ésta sin ponerse de manifiesto.

Fermi dio a esta partícula el nombre de *neutrino*, disminutivo de neutrón. Su masa en reposo, como suponía Pauli, resultó ser nula[1]. El sentido de estas palabras es sencillo: neutrinos en reposo no existen. En cuanto aparecen se mueven ya con la velocidad de 300 000 km/s. Se calculó cómo interaccionan los

[1] En 1980 se conoció la noticia del descubrimiento de una masa en reposo muy pequeña del neutrino. Por ahora este resultado no puede considerarse establecido indudablemente.

neutrinos con la sustancia en una capa de determinado espesor. En el sentido de poder descubrir esta partícula experimentalmente, el resultado fue poco consolador. La esfera terrestre es para el neutrino más transparente que el mejor vidrio para la luz.

DESINTEGRACIÓN DEL NEUTRÓN LIBRE. El papel del neutrino no se reduce a explicar la desintegración β de los núcleos. Muchas partículas elementales en estado libre se desintegran espontáneamente con emisión de un neutrino. En primer lugar se comporta así el neutrón. Éste sólo adquiere estabilidad en los núcleos, a expensas de las interacciones con los otros nucleones. Pero libre el neutrón vive nada más que 15 min en promedio. Esto fue demostrado por vía experimental únicamente después de haber sido construidos los reactores nucleares que producen flujos potentes de neutrones.

Lo mismo que otras partículas, el neutrino (cuyo símbolo es ν) tiene antipartícula, llamada antineutrino (su símbolo es $\bar{\nu}$). Durante la desintegración del neutrón en un protón y un electrón es emitido precisamente un antineutrino:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

La energía del neutrón es siempre mayor que la suma de las energías del protón y el electrón. La energía sobrante se la lleva el antineutrino.

DESCUBRIMIENTO EXPERIMENTAL DEL NEUTRINO. A pesar de parecer inatrapable, el neutrino (o más exactamente, el antineutrino), después de 26 años de "existencia fantasmal" en las revistas científicas, fue descubierto experimentalmente. La teoría predijo que si un antineutrino chocaba con un protón se formaría un positrón y un neutrón.

$$p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$$

La probabilidad de este proceso es muy pequeña a causa del extraordinario poder de penetración del antineutrino. Pero si los antineutrinos son muchos cabe la esperanza de poder descubrirlos. Una cantidad enorme de antineutrinos se produce durante el funcionamiento de un reactor nuclear, ya que al desintegrarse los átomos de uranio se forma una multitud de fragmentos radiactivos β con período de vida pequeño. Precisamente junto a un reactor (el experimento fue hecho en 1956 en EE.UU.) se enterró un cajón con paredes de plomo y parafina. En el cajón había 200 l de agua, que contenía cadmio, rodeada de una capa de centellador líquido (cerca de 300 l). El centellador lanzaba destellos cuando a través de él pasaban cuantos γ.

El positrón aparecido cuando un antineutrino chocaba con uno de los protones de las moléculas de agua (punto *A* en la fig. 258), se aniquilaba inmediatamente con uno de los electrones (punto *B*), dando dos cuantos γ. Los cuantos gamma producían destellos del centellador, los cuales se registraban por aparatos especiales. El neutrón formado en esta reacción, después de cierto "vagabundeo", era capturado por un núcleo de cadmio (punto *C*). Este núcleo emitía varios cuantos γ, lo que servía de señal de haberse producido la reacción provocada por el neutrón recién formado. La aparición primero de dos cuantos lanzados en sentidos distintos y después, al cabo de un pequeño intervalo de tiempo, de varios cuantos γ más, confirmó la existencia del antineutrino. Ésta

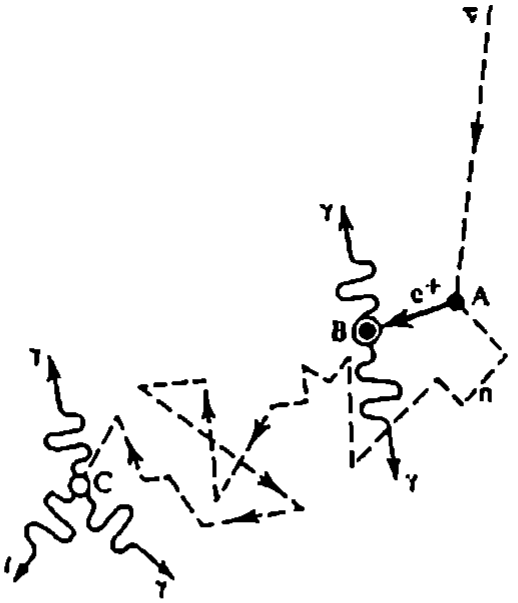


Fig. 258

quedo establecida con el grado de certeza posible en las investigaciones que atañen al mundo de las partículas elementales.

ESENCIA DE LA DESINTEGRACIÓN DE LAS PARTICULAS ELEMENTALES Advertiremos para terminar, que la desintegración del neutron y de las demás partículas elementales consiste en una transformación en el mundo de dichas partículas y no una descomposición de un sistema complejo en sus partes componentes.

La relación entre las partículas "hijas" y la partícula "progenitora" no se parece en nada a la relación entre una vasija rota y la vasija entera. En el caso de la desintegración del neutrón, por ejemplo, esto es evidente: como el antineutrino sólo puede existir moviéndose en línea recta a la velocidad de la luz, no puede encontrarse dentro del neutrón. El protón y el electrón que aparecen al desintegrarse el neutrón pueden formar un sistema estable. Pero éste será el bien conocido y perfectamente estudiado átomo de hidrógeno, y no el neutrón

Lo mismo ocurre con otras partículas que sólo viven un intervalo de tiempo determinado La desintegracion de una partícula no es indicio de que ésta no sea elemental. El neutrón, a pesar de su inestabilidad, se considera partícula elemental, mientras que el núcleo del átomo del hidrógeno pesado (*deutrón*), aunque sea estable, está formado, sin duda alguna, por un neutrón y un protón.

13.4. ¿Cuántas partículas elementales existen?

Las dudas acerca de si todas las partículas que ahora se llaman elementales justifican plenamente este nombre son muy grandes. El fundamento para estas dudas es sencillo: son demasiadas partículas.

El descubrimiento de una partícula elemental nueva siempre ha constituido y continúa constituyendo un destacado triunfo de la ciencia Pero hace ya mucho tiempo que a cada nuevo triunfo comenzó a mezclarse una parte de impaciencia Los triunfos se han ido sucediendo unos a otros literalmente

Fue descubierto el grupo de las llamadas partículas "*extrañas*": mesones K e hiperones con masas mayores que las de los nucleones. En los años 70 se añadió el grupo de partículas "con encanto", cuyo número cuántico "*charm*" es distinto de cero, con masas aún mayores. Además se han descubierto unas partículas de corta existencia, cuyo período de vida es del orden de 10^{-22} a 10^{-23} s. Estas partículas recibieron el nombre de *resonancias* y su número pasa de doscientas

Si se excluyen las resonancias de corta vida y las recién descubiertas partículas "con encanto", también de corto período de vida, obtenemos la tabla de 39 partículas elementales que se da en la pág. 336.

En dicha tabla todas las partículas están divididas en grupos y (excepto el mesón τ) dispuestas según el orden del incremento de la masa

La tabla la abre el *fotón*. Éste, en solitario, forma el grupo primero.

El grupo siguiente lo constituyen las partículas ligeras, *leptones*. En él figuran doce partículas (incluidas las antipartículas). Hay tres tipos de *neutrinos*: el neutrino electrónico, que se forma junto con los electrones; el neutrino muónico, que lo hace junto con los mesones μ, y el neutrino mesónico τ, que aparece junto con los mesones τ. Después viene el electrón, el mesón μ y, finalmente, el mesón τ, descubierto en 1975. Aunque el mesón τ tiene una masa muy grande, se ha incluido en el grupo de los leptones porque todas sus demás propiedades se parecen a las de éstos. La propiedad fundamental que lo asemeja a los demás leptones es la de que esta partícula, lo mismo que los otros leptones, no toma parte en las interacciones fuertes. En cuanto al neutrino mesónico τ, aún no se ha descubierto experimentalmente, pero su existencia no suscita dudas.

Siguen después los *mesones*. Este grupo está formado por ocho partículas. Las más ligeras de ellas son los mesones π: positivos, negativos y neutros. Sus masas respectivas son iguales a 264 (π^0) y 273 (π^+ y π^-) masas electrónicas. Los piones son cuantos de campo nuclear, de un modo semejante a como los fotones son cuantos de campo electromagnético. Existen además cuatro mesones K y un mesón η^0.

El último grupo, el de los *bariones*, es el más extenso. Lo forman 18 de las 39 partículas. Los más ligeros de los bariones son los nucleones (protones y neutrones). Les siguen los llamados hiperones. Cierra la tabla la partícula Ω^- (omega menos), descubierta en 1964. Su masa es 3273 veces mayor que la del electrón.

LOS QUARKS Y LOS LEPTONES COMO PARTÍCULAS VERDADERAMENTE ELEMENTALES. La existencia de tan gran número de partículas hace pensar que no todas ellas son elementales en igual medida.

Ya en 1963 M. GELL-MANN y G. ZWEIG propusieron un modelo según el cual todas las partículas que participan en las interacciones fuertes (nucleares) están formadas por partículas más fundamentales (o primarias) que denominaron *quarks* (españolizado, *cuarques*). Excepto los fotones y los leptones, todas las partículas descubiertas son compuestas.

Inicialmente se introdujo la hipótesis de que existen tres cuarques (y, respectivamente, tres anticuarques). Los cuarques deben tener cargas eléctricas fraccionarias. Se designan con las letras u, d y s. Los primeros, cuarques u,

tienen la carga $+ {}^{2}/_{3}e$; los cuarques *d* y *s* tienen la misma carga, igual a $- {}^{1}/_{3}e$ (donde *e* es el módulo de la carga del electrón). El protón consta de dos cuarques *u* y un cuarque *d*; los piones son combinaciones *cuarque – anticuarque* y así sucesivamente. Las partículas extrañas (kaones e hiperones) contienen el cuarque más pesado, el *s*, llamado "extraño"

Se ha predicho la existencia de un cuarto cuarque, el denominado *cuarque c*, con charm no nulo. Más tarde fueron descubiertas por vía experimental partículas que contienen este cuarque La masa del cuarque *c* es mayor que la del cuarque *s*

Los experimentos de dispersión de neutrinos y electrones de energías ultraaltas por los nucleones han confirmado la estructura "cuárquica" tanto de los protones como de los neutrones. Pero desintegrar los nucleones en cuarques no ha sido posible.

Los cuarques se han buscado y se buscan aún entre las rocas continentales, en los sedimentos en el fondo del océano y en el suelo lunar. Pero cuarques libres no se han encontrado.

Por lo visto las fuerzas que actúan entre los cuarques no disminuyen con la distancia, como todas las demás fuerzas, sino que aumentan Si esto es así, nunca se conseguirá desintegrar los nucleones y otras partículas en cuarques. El protón y otras partículas tienen estructura compleja, pero dividirlas en partes es imposible.

Según las ideas modernas todos los leptones, lo mismo que los cuarques, carecen de estructura interna. En este sentido los leptones y los cuarques pueden considerarse partículas verdaderamente elementales. Aparte de las antipartículas, hasta ahora se han descubierto seis leptones. Cuarques se han descubierto cinco El quinto es el llamado cuarque *b*, y su masa es mayor que la del cuarque *c*. Se supone que existe un sexto cuarque, de masa mayor aún que la del cuarque *b* El análisis teórico lleva a la conclusión de que debe existir la simetría "cuarco-leptónica": toda la materia está construida con seis leptones y seis cuarques diferentes. Junto con sus antipartículas, estas partículas verdaderamente elementales serán en total 24

A ellas debe añadirse el cuanto de campo electromagnético o fotón y el cuanto del campo que efectúa la interacción entre los cuarques. Las partículas de este campo se llaman *gluones* Los gluones aún no se han descubierto experimentalmente. También deben existir cuantos del campo de las interacciones débiles o *bosones vectoriales*. Éstos tampoco han sido descubiertos hasta ahora.

Así, pues, el cuadro de la estructura de la materia en su nivel más profundo ha resultado ser muy complejo. La teoría de las fuerzas "intercuárquicas" no está acabada aún. Es posible que en el futuro se descubran aún cuarques y leptones de mayor masa.

No obstante, puede decirse que durante los últimos años se han logrado éxitos enormes en la física de las partículas elementales Se ha descubierto una serie de nuevas partículas, se ha establecido la estructura "cuárquica" de las partículas que interaccionan fuertemente También tiene importancia el haberse iniciado la creación de una teoría única de todas las fuerzas de la naturaleza Las interacciones electromagnéticas y débiles ya han sido incluidas dentro del marco de la teoría única

¿ ?

1 El electrón es la partícula más ligera entre las cargadas. ¿Cuál de las leyes de conservación que usted conoce prohibe la transformación del mismo en fotones?
2. Al aniquilarse un electron y un positrón lentos se forman dos cuantos γ. ¿Bajo qué ángulo entre sí salen lanzados?
3 ¿Cuál es la frecuencia de los cuantos γ que se forman en las condiciones indicadas en la pregunta anterior?
4 ¿Por qué el neutrón libre se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino, mientras que el protón libre no puede desintegrarse en un neutrón, un positrón y un neutrino?
5 ¿Se puede observar en la cámara de niebla la traza de una partícula cargada, cuyo período de vida sea de 10^{-21} s?
6 ¿Qué es un quark (o cuarque)?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 13

Las partículas elementales son las partículas primarias, indivisibles de que está hecha toda la materia.

Pero las partículas elementales no permanecen invariables. Todas las partículas elementales son capaces de transformarse unas en otras y estas transformaciones mutuas son el hecho más importante de su existencia.

La mayoría de las partículas elementales son inestables y con el tiempo se transforman espontáneamente en otras partículas; excepciones de esto son el fotón, el electrón, el protón y el neutrino.

Todas las partículas tienen sosias o antipartículas Por ejemplo, respecto del electrón, la antipartícula es el positrón. La partícula y la antipartícula tienen la misma masa, pero sus cargas tienen signos contrarios Cuando una partícula se encuentra con su antipartícula ambas desaparecen (se aniquilan) transformándose en otras partículas La aniquilación del positrón y el electrón va acompañada de la formación de dos (o tres) cuantos gamma.

El desarrollo de la técnica de registro de las partículas elementales y la creación de reactores nucleares dio la posibilidad de descubrir experimentalmente el neutrino. Esta partícula interacciona muy débilmente con la sustancia. Fue predicha, basándose en la ley de conservación de la energía, 26 años antes de ser descubierta. Se ha demostrado empíricamente la existencia de distintos tipos de neutrino.

El número de partículas elementales descubiertas en los años 70 es de varias decenas Además se reveló la existencia de más de doscientas partículas de corta vida, denominadas resonancias (su período de vida es del orden de 10^{-23} s).

En relación con esto se ha propuesto una hipótesis según la cual la mayoría de las partículas elementales están formadas por partículas más fundamentales, denominadas quarks o cuarques Los cuarques se han descubierto dentro de los protones y neutrones al observar la dispersión de los electrones y neutrinos de grandes energías por los nucleones Pero en estado libre los cuarques no se han descubierto y es probable que sea imposible desintegrar los nucleones y otras partículas en cuarques.

En la actualidad se construye con éxito la teoría única de las distintas interacciones Ya se han reunido dentro del marco de una teoría las interacciones electromagnéticas y las débiles

Tabla de las partículas elementales

	Nombre de la partícula	Símbolo: Partícula	Símbolo: Anti-partícula	Masa (en masas de electrón)	Carga eléctrica	Vida media, s
	Fotón	γ	γ	0	0	Estable
Leptones	Neutrino electrónico	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Estable
Leptones	Neutrino μ-mesónico	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Estable
Leptones	Neutrino τ-mesónico	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Estable
Leptones	Electrón	e^-	e^+	1	−1	Estable
Leptones	Mesón mu	μ^-	μ^+	206,7	−1	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
Leptones	Mesón tau	τ^-	τ^+	3528	0	$3{,}5 \cdot 10^{-12}$
Mesones	Mesones pi (piones)	π^0	π^0	264,1	0	$0{,}8 \cdot 10^{-16}$
Mesones		π^+	π^-	273,1	1	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
Mesones	Mesones K (kaones)	K^+	K^-	966,4	1	$1{,}23 \cdot 10^{-8}$
Mesones						$K_S^0 - 0{,}86 \cdot 10^{-10}$
Mesones		K^0	$\bar{K}^0$	974,1	0	$K_L^0 - 5{,}38 \cdot 10^{-8}$
Mesones	η^0-mesón	η^0	η^0	1074	0	10^{-17}
Bariones — Nucleones	Protón	p	$\bar{p}$	1836,1	1	Estable
Bariones — Nucleones	Neutrón	n	$\bar{n}$	1836,6	0	10^3
Bariones — Hiperones	Hiperones lambda	Λ	$\bar{\Lambda}^0$	2184,1	0	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$
Bariones — Hiperones	Hiperones sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$
Bariones — Hiperones		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	10^{-14}
Bariones — Hiperones		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	−1	$1{,}49 \cdot 10^{-10}$
Bariones — Hiperones	Hiperones xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	$3{,}03 \cdot 10^{-10}$
Bariones — Hiperones		Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	−1	$1{,}66 \cdot 10^{-10}$
Bariones — Hiperones	Partícula omega menos	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	−1	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$

Importancia de la física para explicar el mundo y el desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad

14.1. Interpretación física del mundo como un todo único

Hemos terminado el curso de física. Durante él cada cual ha podido conocer en mayor o menor grado los resultados del enorme esfuerzo de investigación de las diversas formas del movimiento de la materia, la estructura y las propiedades de los cuerpos materiales, realizado durante muchos siglos por los científicos de todo el mundo.

Por la física conocemos las leyes más generales de la naturaleza, que rigen los procesos que se desarrollan en el mundo que nos rodea y en el Universo en conjunto.

La física tiene por objeto describir las leyes generales de la naturaleza y explicar, basándose en ellas, los procesos concretos. A medida que se iba avanzando hacia este fin, ante los científicos paulatinamente se dibujaba el majestuoso e intrincado cuadro de la unidad de la naturaleza. El mundo no es un conjunto de hechos dispersos, independientes unos de otros, sino de manifestaciones diversas y múltiples de un todo único.

INTERPRETACIÓN MECÁNICA DEL MUNDO. A muchas generaciones de científicos admiró, y sigue admirando, la majestuosa y acabada interpretación del mundo creada sobre la base de la mecánica de Newton. Según Newton todo el mundo está formado por "partículas sólidas, pesadas, impenetrables y móviles". Estas "partículas primarias, son absolutamente rígidas: incomparablemente más rígidas que los cuerpos formados por ellas, y tan duras que nunca se desgastan ni se hacen añicos". Se diferencian unas de otras cuantitativamente, por sus masas. Toda la magnificencia, toda la diversidad cualitativa del mundo es resultado de las diferencias del movimiento de las partículas. La esencia intrínseca de las partículas queda en segundo plano.

De base para esta interpretación unitaria del mundo sirvió el carácter universal de las leyes del movimiento de los cuerpos descubiertas por Newton. A estas leyes se subordinan con asombrosa exactitud tanto los enormes cuerpos celestes como los diminutos granitos de arena que arrastra el viento. Incluso el viento – movimiento de partículas invisibles de aire – cumple estas mismas leyes. Durante mucho tiempo los hombres de ciencia estuvieron convencidos de que las únicas leyes fundamentales de la naturaleza eran las de la mecánica de Newton. Así, el científico francés J. LAGRANGE consideró a Newton como "el más feliz de los hombres, porque sólo una vez y sólo un hombre está predestinado a estructurar una interpretación cabal del mundo".

Pero la simple interpretación mecánica del mundo resultó ser inconsistente. Al estudiar los procesos electromagnéticos se aclaró que éstos no se subordinan a la mecánica de Newton. Maxwell descubrió un nuevo tipo de leyes fundamentales que no se reducen a la mecánica de Newton, las leyes del comportamiento del campo electromagnético.

INTERPRETACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL MUNDO. En la mecánica de Newton se suponía que los cuerpos actúan entre sí directamente a través del vacío y que estas interacciones se realizan instantáneamente (teoría de la acción a distancia). Después de la creación de la electrodinámica cambiaron esencialmente las ideas acerca de las fuerzas. Cada uno de los cuerpos que interaccionan crea un campo electromagnético que, con velocidad finita, se propaga en el espacio. La interacción se efectúa por medio de este campo (teoría de la acción próxima).

Las fuerzas electromagnéticas están extraordinariamente extendidas en la naturaleza. Actúan en el núcleo atómico, en el átomo, en la molécula, entre las moléculas aisladas y en los cuerpos macroscópicos. Esto ocurre porque en la composición de todos los átomos entran partículas eléctricamente cargadas. La acción de las fuerzas electromagnéticas se manifiesta a distancias muy pequeñas (núcleo) y a distancias cósmicas (radiación electromagnética de las estrellas).

El desarrollo de la electrodinámica condujo a intentar dar una *interpretación electromagnética única del mundo*. De acuerdo con ella todos los sucesos que ocurren en el mundo están regidos por las leyes de las interacciones electromagnéticas.

La interpretación electromagnética del mundo llegó a su punto culminante al crearse la teoría especial de la relatividad. Entonces se comprendió la importancia fundamental del carácter finito de la velocidad de propagación de las interacciones electromagnéticas, se creó una nueva teoría del espacio y el tiempo, se hallaron las ecuaciones relativistas del movimiento que sustituyen a las de Newton cuando las velocidades son grandes.

Si en la época en que florecía la interpretación mecánica del mundo se intentó reducir los fenómenos electromagnéticos a procesos mecánicos en un medio especial (el éter universal), ahora se tendía a lo contrario, es decir, a deducir las leyes del movimiento de las partículas a partir de la teoría electromagnética. Se trató de considerar las partículas de sustancia como "concentraciones" del campo electromagnético.

Pero no se consiguió reducir todos los procesos de la naturaleza a fenómenos electromagnéticos. Las leyes del movimiento de las partículas y la ley de la interacción gravitatoria no se pueden deducir de la teoría del campo electromagnético. Además, se descubrieron las partículas eléctricamente neutras y nuevos tipos de interacciones. La naturaleza resultó ser más compleja que se suponía al principio: ni una ley única del movimiento, ni una fuerza única son capaces de abarcar toda la diversidad de procesos que se desarrollan en el mundo.

UNICIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA. El mundo es tan diverso que, indudablemente, todos los cuerpos no pueden estar formados por partículas de un mismo tipo. Pero, aunque parezca asombroso, la sustancia de las estrellas es exactamente la misma que la sustancia de que está constituida la Tierra. Los átomos que componen todos los cuerpos del Universo son

exactamente iguales Los organismos vivos están formados por los mismos átomos que los inanimados.

Todos los átomos tienen la misma estructura y están formados por partículas elementales de tres tipos. Tienen núcleos de protones y neutrones, rodeados de electrones La interacción entre los núcleos y los electrones se efectúa por el campo electromagnético, cuyos cuantos son los fotones.

La interacción entre los protones y los neutrones en el núcleo se realiza, en cambio, fundamentalmente por medio de los mesones π, que son cuantos del campo nuclear. Cuando se desintegran los neutrones aparecen neutrinos. Además de éstas se han descubierto otras muchas partículas elementales Pero únicamente cuando interaccionan partículas, cuyas energías son muy grandes, aquéllas empiezan a desempeñar un papel apreciable

En la primera mitad del siglo XX se descubrió un hecho fundamental: todas las partículas elementales son capaces de transformarse unas en otras

Después del descubrimiento de las partículas elementales y sus transformaciones, el primer plano de la interpretación unitaria del mundo pasó a ocuparlo la UNICIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LA NATURALEZA En la base de esta unicidad se encuentra la materialidad de todas las partículas elementales Las distintas partículas elementales son formas diferentes concretas de existencia de la materia

INTERPRETACIÓN FÍSICA MODERNA DEL MUNDO. La unidad esencial del mundo no se agota con la unicidad de la estructura de la materia. Se manifiesta también en las leyes del movimiento de las partículas y de sus interacciones

A pesar de la extraordinaria diversidad de las interacciones de los cuerpos entre sí, en la naturaleza sólo existen, de acuerdo con los datos actuales, cuatro tipos de fuerzas: *gravitatorias, electromagnéticas, nucleares* y *débiles*. Las últimas se revelan principalmente en las transformaciones de las partículas elementales unas en otras. Con manifestaciones de estos cuatro tipos de fuerzas nos encontramos en los espacios ilimitados del Universo, en cualquier cuerpo de la Tierra (incluidos los organismos vivos), en los átomos y núcleos atómicos y en todas las transformaciones de partículas elementales.

El cambio revolucionario de las ideas clásicas en la interpretación física del mundo se produjo después del descubrimiento de las propiedades cuánticas de la materia. Con la aparición de la física cuántica, que describe el movimiento de las microparticulas, empezaron a columbrarse los nuevos elementos de la interpretación del mundo como un todo único

La división de la materia en sustancia, con estructura continua, y campo discontinuo ha perdido su sentido absoluto. Cada campo tiene sus cuantos: el campo electromagnético, los fotones; el nuclear, los mesones π y así sucesivamente. A su vez, todas las partículas tienen propiedades ondulatorias. La dualidad corpuscular-ondulatoria es propia de todas las formas de la materia.

La descripción de las propiedades, al parecer contradictorias, corpusculares y ondulatorias dentro del marco de una teoría única fue posible en virtud de que las leyes del movimiento de todas las microparticulas sin excepción tienen carácter ESTADÍSTICO (PROBABILÍSTICO) Este hecho hace imposible predecir unívocamente el comportamiento de los microobjetos.

Los principios de la teoría cuántica son totalmente generales, aplicables para definir el movimiento de todas las partículas, las interacciones entre ellas y sus transformaciones mutuas.

Así, pues, la física moderna nos muestra sin duda alguna los rasgos de la unicidad esencial de la naturaleza. Pero, a pesar de todo, es mucho, y quizá hasta la esencia misma de la unidad del mundo, lo que aún no se ha logrado captar. Se desconoce por qué existen tantas partículas elementales diferentes, por qué tienen tales o cuales valores de masa, carga y otras características. Hasta ahora todas estas magnitudes se determinan experimentalmente.

No obstante, cada vez se va viendo más claramente la relación entre los distintos tipos de interacciones. Ya se han unido dentro del marco de una misma teoría las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles. Se conoce la estructura de la mayoría de las partículas elementales. Es muy probable que la física de las partículas elementales esté en el umbral de grandes descubrimientos.

"Aquí se ocultan secretos tan profundos e ideas tan elevadas que, a pesar de los esfuerzos de centenares de agudísimos pensadores que trabajaron miles de años, aún no se ha logrado penetrar en ellos y la alegría de las búsquedas y los descubrimientos creadores aún sigue existiendo". Estas palabras dichas por Galileo hace tres siglos y medio no han envejecido en absoluto.

CONCEPCIÓN CIENTÍFICA DEL MUNDO. Las leyes fundamentales establecidas por la física, por su complejidad y comunidad, sobrepasan mucho los hechos con los cuales comienza la investigación de cualesquiera fenómenos. Pero son tan fidedignas y objetivas como los conocimientos sobre los fenómenos simples que se observan directamente. Estas leyes no se infringen nunca, cualesquiera que sean las condiciones.

Cada vez son más las gentes que comprenden que las leyes objetivas que sigue la naturaleza excluyen los milagros y que el conocimiento de estas leyes acrecienta el poder del hombre sobre la naturaleza.

En el pasado la sociedad humana ligaba sus normas de conducta principalmente con la creencia en lo sobrenatural, en la religión. Esta última implica la idea de que las posibilidades del hombre son limitadas o de la existencia de la voluntad divina, que dirige la vida de los hombres hacia un fin determinado. Puede afirmarse que los adelantos de la ciencia en la explicación de la naturaleza socava este sistema de razonamientos.

14.2. La física y la revolución científico-técnica[1]

En la actualidad continúa desarrollándose la gran revolución científico-técnica que comenzó hace cerca de un cuarto de siglo. Con ella se han producido profundos cambios cualitativos en muchas ramas de la ciencia y de la técnica. Una de las ciencias más antiguas, la astronomía, experimenta la revolución debida a la salida del hombre al espacio cósmico. La aparición de la biología molecular y la genética han revolucionado la biología, y la creación de la llamada química grande ha sido posible gracias a la

[1] El autor de este párrafo es V. A. Leshkóvtsev.

revolución de la ciencia química. Procesos análogos tienen lugar en la geología, meteorología y en muchas otras ciencias modernas.

Profundos cambios cualitativos se producen también en nuestros días en todas las ramas principales de la técnica. En la energética la revolución está vinculada, en particular, con el paso de las centrales eléctricas térmicas, que funcionan con combustible orgánico, a las centrales eléctricas atómicas. En la rama que se ocupa de materiales nuevos viene condicionada por la creación de la industria de los materiales artificiales, con propiedades extraordinarias, muy importantes desde el punto de vista práctico La mecanización y automatización compleja conducen a una inevitable revolución en la industria y la agricultura. El transporte, la construcción y las comunicaciones se transforman en ramas esencialmente nuevas y mucho más productivas y perfectas de la técnica moderna

La revolución científico-técnica ha cambiado radicalmente el papel de la ciencia en la vida de la sociedad. La ciencia se ha convertido en una fuerza productiva directa. De ahora en adelante la suerte de la producción de los bienes materiales que la humanidad necesita va a depender directamente de los adelantos de la ciencia

La revolución científico-técnica impone inevitablemente a la humanidad una grandiosa reconstrucción y perfeccionamiento de todas las esferas de la producción

Al mismo tiempo la revolución científico-técnica hace que el problema de la defensa del medio ambiente cobre extraordinaria actualidad.

Entre las ciencias naturales modernas, la física es una de las más destacadas Ella ejerce una enorme influencia sobre otras ramas de la ciencia, de la técnica y de la producción. He aquí algunos ejemplos de dicha influencia

Durante milenios los astrónomos solo tuvieron la información sobre los fenómenos celestes que les proporcionaba la luz visible. Puede decirse que estudiaban dichos fenómenos a través de una estrecha rendija del extenso espectro de las radiaciones electromagnéticas. Hace tres decenios, en virtud del desarrollo de la radiofísica surgió la radioastronomía, que ensanchó extraordinariamente nuestros conocimientos del Universo. Ella nos ayudó a conocer la existencia de muchos objetos cósmicos antes ignorados. En fuente adicional de conocimientos astronómicos se ha convertido la parte de la escala de las ondas electromagnéticas que se encuentra en la gama de ondas hertzianas.

Una riquísima información científica aportan del cosmos otros tipos de radiación electromagnética que no llegan a la superficie de la Tierra, porque son absorbidas por la atmósfera. Con la salida del hombre al espacio cósmico han nacido nuevas especialidades de la astronomía que cambian su carácter, tales como la astronomía ultravioleta e infrarroja, la astronomía de rayos X y la astronomía de rayos gamma. Se ha ensanchado enormemente la posibilidad de estudiar los rayos cósmicos primarios que inciden sobre el límite de la atmósfera terrestre En el transcurso de esta revolución los astrónomos han conseguido por primera vez poder investigar todos los tipos de partículas y radiaciones que llegan del espacio cósmico. El volumen de la información científica obtenida por los astrónomos durante los últimos decenios supera mucho el de la información conseguida durante toda la historia anterior de la

astronomía. Los métodos de investigación y los aparatos registradores que se utilizan con este fin han sido tomados del arsenal de la física moderna; la antigua astronomía se transforma así en la nueva astrofísica.

Se están creando las bases de la astronomía neutrínica, que aportará a los científicos información acerca de los procesos que tienen lugar en las entrañas de los cuerpos celestes, por ejemplo, en las profundidades de nuestro Sol. La creación de la astronomía neutrínica sólo ha sido posible gracias a los éxitos alcanzados por la física de los núcleos atómicos y de las partículas elementales.

La revolución en la biología se suele relacionar con la aparición de la biología molecular y la genética, que estudian los procesos vitales a nivel molecular. Los medios y métodos fundamentales que utiliza la biología molecular para detectar, aislar y estudiar sus objetos (microscopios electrónicos y protónicos, análisis estructural por rayos X, electronografía, análisis neutrónico, átomos trazadores, ultracentrífugadoras, etc.) también han sido tomados de la física. Sin estos medios nacidos en los laboratorios físicos, los biólogos no hubieran podido penetrar en un nivel cualitativamente nuevo de investigación de los procesos que se desarrollan en los organismos vivos. Así, pues, la utilización de los métodos físicos ha tenido una importancia definitiva en la creación y desarrollo de la biología molecular y de la genética.

Un papel muy importante desempeña la física moderna en la reconstrucción de la química, la geología, la oceanología y otras ciencias naturales.

La física se encuentra también en los orígenes de las transformaciones revolucionarias de todas las ramas de la técnica. Sobre la base de sus logros se reconstruyen la energética, las comunicaciones, el transporte, la construcción y la producción industrial y agrícola.

La revolución en la energética ha sido provocada por el surgimiento de la energía atómica. Las reservas de energía que se encuentran en el combustible atómico superan mucho las aún no gastadas de combustible convencional. El carbón, el petróleo y el gas natural se han convertido en nuestros días en materia prima fundamental para la gran industria química. Quemarlos en grandes cantidades es producir un daño irreparable a esta importante rama de la producción moderna. Por eso es muy conveniente utilizar para los fines energéticos combustible atómico (uranio, torio). Esas son las ventajas principales de la energía atómica.

Las centrales eléctricas termonucleares están llamadas a liberar la humanidad en el futuro de su preocupación por las fuentes de energía. Como ya se sabe, los fundamentos científicos de la energía atómica y termonuclear se apoyan totalmente en los logros obtenidos por la física de los núcleos atómicos.

La técnica del futuro se creará no a base de materiales acabados de origen natural, que ya en nuestros días no pueden garantizar su seguridad y larga duración, sino con materiales sintéticos de propiedades preestablecidas. En la creación de esos materiales, junto a la gran química, van a desempeñar un papel cada vez más importante los métodos físicos de influir sobre la sustancia (haces electrónicos, iónicos y láser; campos magnéticos superintensos; presiones y temperaturas ultraaltas; ultrasonido, etc.). En ellos se funda la posibilidad de obtener materiales con características extremas y de crear métodos nuevos en principio de tratamiento de las sustancias, que cambiarán radicalmente la tecnología de las industrias modernas.

Trabajos de laboratorio

1. Determinación de la aceleración de caída libre por medio de un péndulo

APARATOS Y MATERIALES: una bolita taladrada, hilo, un soporte con sujetador y anillo, un reloj con segundero y una cinta métrica

Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo

1. Colocar el soporte sobre la mesa, junto a su borde. Fijar el anillo con el sujetador en el extremo superior del soporte y colgar de aquél la bolita suspendida del hilo. Ésta debe quedar a 1 ó 2 cm de distancia del suelo.

2 Hacer que el péndulo oscile, desviando la bolita hacia un lado de 5 a 8 cm y soltándola.

3 Contar el número n de periodos que realiza durante un tiempo t igual a 1 o 1,5 min

4 Medir con la cinta métrica la longitud l del péndulo.

5 Aplicando la fórmula del periodo de las oscilaciones del pendulo

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

calcular la aceleracion de caida libre g

6 Apreciar el error

2. Determinación del indice de refracción del vidrio, valiéndose de una lámina de caras plano-paralelas

APARATOS Y MATERIALES: una lámpara de pie, una batería de acumuladores, un interruptor, una lámina de vidrio con dos caras planas y paralelas, una pantalla con rendija, una escuadra, un transportador, papel blanco y conductores de conexión

Indicaciones sobre cómo realizar el trabajo

1 Montar el circuito electrico, conectando la lámpara con la batería a través del interruptor.

2. Colocar delante de la lámpara la pantalla con rendija y detras de esta la hoja de papel blanco

3. Cerrar el circuito y obtener una estrecha franja de luz brillante (rayo de luz) sobre el papel.

4 Colocar transversalmente a la franja de luz la lámina de vidrio.

5 Dibujar con lápiz sobre el papel unas rayas a lo largo de las caras refractoras e indicar el principio A y el fin B del rayo incidente y el punto C de emergencia del rayo de la lámina de vidrio (fig. 259)

6 Abrir el circuito y quitar la lámina

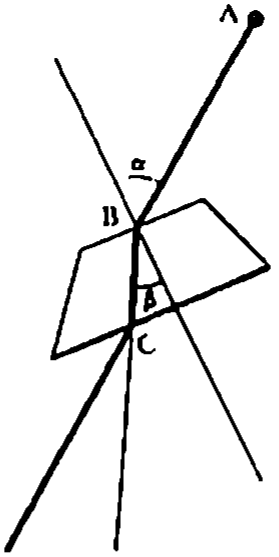


Fig. 259

7. Dibujar los rayos incidente y refractado y la perpendicular a la lámina en el punto de incidencia.

8 Medir los ángulos de incidencia α y de refracción β con el transportador

9. Calcular el índice de refracción por la fórmula

$$n = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta}.$$

10 Repetir el experimento con otros ángulos de incidencia y comparar los resultados

3. Determinación de la distancia focal y la potencia óptica de una lente convergente

APARATOS Y MATERIALES: una lámpara de pie, una batería de acumuladores, un interruptor, una cinta métrica, una lente convergente de foco largo, una pantalla blanca con rendija, una regla guía y conductores de conexión.

Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo

1. Montar el circuito eléctrico, conectando la lámpara con la batería a través del interruptor.

2. Colocar la lámpara junto a un borde de la mesa y la pantalla junto al borde opuesto Entre ellas situar la lente.

3 Encender la lámpara y correr la lente a lo largo de la regla hasta conseguir que sobre la pantalla se forme una imagen clara del filamento luminoso de la lámpara.

4 Medir la distancia desde la lámpara hasta la lente y desde ésta hasta la pantalla.

5. Aplicando la fórmula de la lente delgada

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d},$$

calcular la distancia focal F de la lente y su potencia óptica D.

6 Colocar la lámpara a una distancia arbitraria d_1 de la lente

7. Conociendo la distancia focal F, calcular por la fórmula

$$f_1 = \frac{d_1 F}{d_1 - F}$$

la distancia f_1 a que debe encontrarse la imagen

8 Comprobar experimentalmente el resultado obtenido.

9 Repetir este último experimento colocando la lámpara a la distancia $d_2 = 2F$ de la lente

4. Observación de la interferencia y la difracción de la luz

APARATOS Y MATERIALES 2 láminas de vidrio, una lámpara con filamento de incandescencia recto (una para toda la clase), un pie de rey.

Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo

PARA OBSERVAR LA INTERFERENCIA

1 Limpiar bien las láminas de vidrio, juntarlas y apretarlas con los dedos

2 Observar las láminas a la luz reflejada sobre fondo oscuro (deben colocarse de tal forma que sobre la superficie del vidrio no se originen reflejos demasiado brillantes de las ventanas o de las paredes blancas).

3. En determinados puntos de contacto de las láminas observar las franjas irisadas brillantes de forma anular o irregular.

4 Observar cómo varía la forma y la posición de las franjas de interferencia obtenidas al cambiar la fuerza con que se aprietan las láminas

5. Procurar ver la figura de interferencia a la luz transmitida.

PARA OBSERVAR LA DIFRACCIÓN

1. Regular la boca del pie de rey de forma que entre sus picos quede una rendija de 0,5 mm de anchura.

2 Colocar esta rendija verticalmente lo más cerca posible del ojo.

3. Mirando a través de ella el filamento luminoso de la lámpara, colocado también verticalmente, observar a ambos lados de él las franjas irisadas (espectros de difracción).

4. Variando la anchura de la rendija desde 0,5 mm hasta 0,8 mm, apreciar como influye esto en los espectros de difracción.

5. Observación de los espectros continuo y de rayas

APARATOS Y MATERIALES. un aparato de proyección, tubos de vidrio con hidrógeno, neón o helio, un inductor de alto voltaje, una batería de acumuladores, un soporte, conductores de conexión (todos estos aparatos son comunes para toda la clase), una placa de vidrio con caras oblicuas que formen 45 y 60° (una para cada alumno)

Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo

1. Colocar la placa de vidrio horizontalmente delante del ojo Observar a través de las caras que forman el ángulo de 45° la franja vertical clara que en

la pantalla reproduce la imagen de la rendija regulable del aparato de proyección

2. Destacar los colores fundamentales del espectro continuo obtenido y escribirlos en el orden en que se observan.

3. Repetir el experimento mirando la franja a través de la cara que forma el ángulo de 60°. Escribir la diferencia de forma de los espectros.

4. Observar los espectros de rayas del hidrógeno, helio o neón, mirando los tubos espectrales luminosos a través de las caras de la placa de vidrio. Anotar las rayas más brillantes de los espectros.

6. Estudio de las trayectorias de las partículas cargadas por sus fotografías

APARATOS Y MATERIALES: fotografía de las trayectorias (fig. 260), una hoja de papel transparente (papel de calco), una escuadra graduada en milímetros y un lápiz.

Indicaciones sobre como hacer el trabajo

En la foto se ven las trayectorias de las partículas en una cámara de niebla sometida a un campo magnético (*I* es la trayectoria del protón)[1]. Las líneas de inducción del campo magnético son perpendiculares al plano de la fotografía. Las velocidades iniciales de ambas partículas son iguales y perpendiculares al borde de la foto.

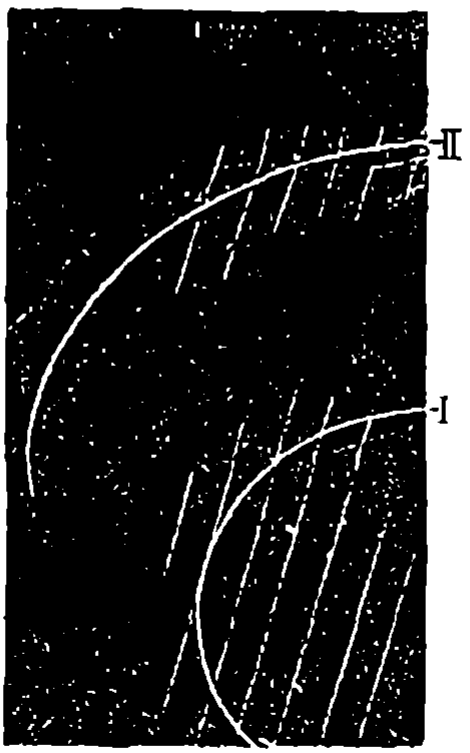


Fig. 260

[1] Las rectas delgadas son los alambritos metálicos a los cuales se comunica la tensión para limpiar la cámara de iones antes de comenzar la observación de las trayectorias.

1. Determinar la dirección (sentido) del vector inducción del campo magnético.

2 Explicar por que las partes de las trayectorias de las partículas son arcos de circunferencias.

3 Explicar por qué en diferentes partes de una misma trayectoria los radios de los arcos son distintos.

4 Explicar qué diferencia hay entre las dos trayectorias de la foto ¿A que se debe esta diferencia?

5. Colocar sobre la fotografía la hoja de papel transparente y copiar en ella con cuidado la trayectoria *I* y el borde derecho de la foto.

6 Determinar el radio de curvatura de la trayectoria en su parte inicial. Para eso hay que dibujar la cuerda de dicha parte inicial y levantar por su centro una perpendicular Hallar el centro del arco de circunferencia y medir el radio

7 Determinar lo mismo para la trayectoria *II*

8 Utilizando la formula (véase el libro "Física 3")

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR},$$

comparar las cargas específicas[2)] de ambas partículas

9. ¿A qué partícula pertenece la trayectoria *II*?

[2)] La carga específica de una partícula es la razón q/m de la carga q a su masa m

Respuestas a los ejercicios

Ejercicio 1. 1. $\approx 15{,}8$ N/m. 2. ≈ 20 s. 3. 9 cm; 25 cm. 4. Aumenta 2,4 veces. 5. La segunda bolita. 6. 0,4 m. 7. $\approx 31{,}4$ cm/s, $\approx -15{,}7$ cm/s^2. 8. ≈ 9 rad/s; $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ J. $\approx 17{,}9$ cm/s. 9. $T = 2\pi\sqrt{R/g}$. 10. 19,2 km/h. 11. 0,1 m.

Ejercicio 2. 1. $5 \cdot 10^{-3}$ J. 2. $\approx 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ s, $\approx 2{,}51 \cdot 10^{-6}$ s. 3. De 16 mH a 10 mH. 4. $\approx 0{,}63$ V/s. $\approx 0{,}63$ V. 6. $\approx 0{,}28$ A. 7. 15 μl.

Ejercicio 3. 1. Los aislamientos entre las láminas deben ser perpendiculares al eje del árbol. 2. La f. e. m. será máxima cuando el plano del cuadro (espira) sea paralelo a las líneas de inducción magnética. 4. Se puede, por ejemplo, enrollar encima de uno de los arrollamientos un devanado adicional con número de espiras conocido y medir la tensión en sus extremos, suministrando al otro arrollamiento una tensión conocida. 5. El transformador puede quemarse, ya que la resistencia de su arrollamiento a la corriente continua es mucho menor que a la alterna. 6. La resistencia de una espira es muy pequeña. En la espira se produce una corriente inducida muy grande. La gran cantidad de calor que se desprende destruye el transformador. 7. 24 pares. 8. 1/10; 22/7, 35/6 y 300/11.

Ejercicio 4. 1. 660 m. 2. ≈ 5000 m/s. 3. 1435 m/s. 4. 180°. 5. Aumenta 4,2 veces aproximadamente. 6. 340 Hz.

Ejercicio 5. 1. No, ya que en el sistema de referencia, con respecto al cual es nula la velocidad del movimiento ordenado de los electrones, los iones de la red se mueven y crean un campo magnético. 2. No. 3. Para longitudes de onda desde $\lambda_1 \approx 92$ m hasta $\lambda_2 \approx 565$ m. 4. Como la antena es horizontal, el vector intensidad del campo eléctrico también será horizontal. Por consiguiente, el vector inducción magnética será vertical. 5. En la Luna no hay ionosfera.

Ejercicio 6. 1. El haz luminoso no se verá. 2. El eclipse de Sol se verá como parcial: la Luna oculta una parte del disco solar. 3. Este fenómeno se debe a la propagación rectilínea de la luz a través del pequeño agujero del postigo de la ventana. 4. Las dimensiones de la penumbra dependen de la distancia desde el obstáculo opaco hasta la pantalla. Cuando la distancia es pequeña (pies) la penumbra es pequeña, y cuando es grande (cabeza) la penumbra es también grande. Si el farol fuera una fuente puntual de luz, las sombras de la cabeza y de los pies se verían igual de nítidas. 5. De 1,2 m a 1 m. 6. A la distancia de 1,6 m del foco f_1. No variará. 7. ≈ 27 lx, $\approx 25{,}6$ lx.

Ejercicio 7. 2 $x = 2l \operatorname{sen}\alpha = 10$ cm. 4. $\pi/2$. El borde inferior del espejo debe distar del suelo la mitad de la distancia desde los ojos hasta el mismo. El borde superior debe encontrarse a una altura menor que la estatura de la persona en una magnitud igual a la mitad de la distancia desde los ojos hasta la coronilla. 5. El espejo plano proporciona una reflexión dirigida, por lo que cada espectador sólo verá una parte pequeña, intensamente iluminada, del fotograma.

Ejercicio 8. 1. 0,55, 1,24 2. 1,4 cm. 3 Hacia el lado del vértice del ángulo refringente del prisma 4 No saldrá. 5. $n = 2$

Ejercicio 9. 1. 12 cm. 2 La imagen seguirá siendo igual de nitida, pero su iluminación disminuirá. 4 El índice de refracción del agua se aproxima mucho al de la sustancia de los ojos, por eso los rayos que llegan al ojo casi no se refractan y, por lo tanto, el ojo se hace muy hipermétrope. 7. 0,3 m. 8. 1) Divergente, virtual; 2) convergente, virtual 10. $\Gamma = 7.11$ A la distancia $F/2$. 13. $-2,25$ dptr

Ejercicio 10 1. $\approx k \cdot 528$ r.p.s. (donde $k = 1, 2, 3, \ldots$) 2. $5,26\ 10^{-7}$ m; 225 200 km/s; $2,98 \cdot 10^{7}$ m, 223 200 km/s 3. La mancha será brillante 4 $\approx 5,2\ 10^{-7}$ m.

Ejercicio 11. 1. Desde el punto de vista del observador que está en tierra, en el punto B (detrás del tren) el rayo cayó antes. 2. La velocidad del electrón es 10 cm/s menor que la de la luz, aproximadamente. 3. $\approx 0,23 \cdot 10^{-11}$ kg.

Ejercicio 12 2 $\approx 1,5$ 3 $4 \cdot 10^{-19}$ J 4. $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$ m 5 $\approx 5\ 10^{14}$ Hz 6 $\approx 3,8\ 10^{-19}$ J. 7 $\approx 1,325\ 10^{-27}$ kg·m/s.

Ejercicio 13. 1. $r_1/r_2 = 25$. $E_1/E_2 = 1/25$ 2 $\approx 2 \cdot 10^{6}$ m/s, $\approx 10^{23}$ m/s^2 3 $\approx 6,9\ 10^{-14}$ m 5 $\approx 4,87\ 10^{-7}$ m 7 $\approx 3,65 \cdot 10^{-7}$ m

Ejercicio 14 1. Ocho transformaciones α y seis transformaciones β. 2 ≈ 2240 años 3. 1,41 veces 4 $\approx 1,72$ MeV. 5 ≈ 200 MeV

Acomodación del ojo 183
Altura del sonido 106
Amplitud 21
Análisis espectral 243-245
Ángulo límite de reflexión total 167
Ángulo visual 183
Anillos de Newton 199
Antipartícula 328
Aparato espectral 239, 240
Artsimóvich, L. A. 317
Átomos marcados (trazadores) 320
Aumento de una lente, angular 185
, lineal 179
Autooscilaciones 37, 38, 70

Bayer, N. G. 279
Baldin, A. M. 327
Balmer, J. 275
Becquerel, A. A. 289 291
Bohr, N. 268 271

Cámara de burbujas 288
niebla 287
Capacitancia 60
Célula fotoeléctrica 260
Cinescopio 142
Circuito oscilante 47
abierto 125
Comunicación radiofónica 131
Constante de Planck 252
Contador de Geiger 286
Cuanto 252

Chadwick, J. 268 301
Cherenkov, P. A. 238

Defectoscopia de rayos X 249
Desintegración del neutrón 331
Detección 134
Deuterio 299
Diferencia de fase 26
Difracción de la luz 207
- las ondas 115, 116
los rayos X 248
Dispersión de la luz 195, 196, 199
Dirac, P. 328
Distancia focal 175
Dosis de radiación 322

Efecto fotoeléctrico 254-258
Einstein, A. 223, 234, 257
Eje óptico principal 172
-- secundario 172, 178
Energía de enlace 304
--- específica 304
-- ionización 275
- en reposo 235
Espectro 196
- continuo 241
de bandas 243
-- rayas 242
Experimento de Fizeau 192
-- Hertz 127
Michelson 222
- Rutherford 267, 291
-- Young 207
Experimentos de Franck y Hertz 276

Fabrikant, V. A. 279
Factor de multiplicación neutrónica 311, 313
Fase de las oscilaciones 25
Fermi, E. 307, 314
Figura de difracción 209
-- interferencia 112
Fizeau, H. L. 192
Fleron, G. N. 310
Flujo luminoso 151
Foco principal 174
Fórmula de la lente delgada 178
-- Thomson 51
Fotones 258, 259
Fotorrelé 260
Fotosíntesis 263
Franck, J. 276
Frecuencia angular (cíclica) 23
- de las oscilaciones 23
- portadora 132
- propia (natural) 23
Fresnel, A. 116, 208
Frisch, O. 308
Fuente puntual de luz 152
Fuerzas nucleares 303

Gell-Mann, M. 333
Generadores de inducción 78
Glaser, D. 288
Guía de luz 168

Hahn, O. 308
Heisenberg, W. 302
Hertz, G. 276

Hertz, H. 124, 216, 222, 254
Hipótesis de Maxwell 120
Planh 330
-- Planck 253
Huygens, Ch. 24, 113, 114

Iconoscopio 142
Iluminación 153
Imagen real 173
- virtual 159, 173, 178
Índice de refracción de la luz 164, 195
Intensidad de la corriente, amplitud 56
---- valor eficaz 56
----,- instantáneo 56
-- luz 153
- del sonido 106
Interacción electromagnética 122
fuerte 303
Interferencia de la luz 197
-- ondas 109, 110
Isótopos 298, 299
Ivanenko, D.D. 302

Joliot-Curie, F. 301
Joliot-Curie, I. 301

Kapitsa, P.L. 268, 288
Kurchatov, I.L. 315

Láseres 279-282
Lange, M. 248
Lebedev, P.N. 262
Lenin, V.I. 89, 327
Lente 171
- convergente 173
delgada 172
- divergente 175
Leontóvich, M.A. 317
Leptones 333
Ley de composición de las velocidades, relativista 228
-- desplazamiento 295, 296
-- la desintegración radiactiva 296-298
--- propagación rectilínea de la luz 150
--- reflexión de la luz 158
----- las ondas 114
--- refracción de la luz 162, 193
Leyes del efecto fotoeléctrico 254-256
Longitud de onda 97
--- luminosa 200
Lorentz, H. 222
Luminiscencia 237-239
Lupa 185
Luz monocromática 239
- natural 214
- planopolarizada 215

Mandelshtam, L.I. 132
Marconi, G. 131
Masa crítica 313
- en reposo 235
Maxwell, J.C. 119, 147, 216, 221, 252
Meitner, Lise 308
Mesones 333
Microscopio 185, 186
Michelson, A.A. 193, 218, 222
Mijáilov, A.A. 25
Misovski, L.V. 289
Modelo de átomo de Bohr 273-275
- -- Thomson 267
-- planetario 268
- nuclear de la gota de líquido 309
- - protones y neutrones 302, 303
Modulación 132, 133
Morley, E. 223

Neutrino 327, 330, 331
Neutrón 301, 302, 330
Núcleo atómico 269, 285
Nucleones 303

Ondas coherentes 112, 198
- longitudinales 93
- transversales 93
Oscilaciones amortiguadas 30
- armónicas 21, 52
- forzadas 31, 45
libres 13, 46
Oscilador de Hertz 125
-- lámpara 70

Par electrón-positrón 328
Partículas elementales 285, 326
Partículas subelementales 327
Pauli, W. 330
Péndulo simple (matemático) 17
Período de las oscilaciones 23
-- semidesintegración 296
- una red de difracción 211
Petrzhak, K.A. 310
Planck, M. 253
Plano focal 175, 178
Polarización de la luz 212-215
Polaroides 215
Popov, A.S. 129-131
Positrón 328
Postulados de Bohr 271-273
-- la teoría de la relatividad 223
Potencia óptica de una lente 175
Presión de la luz 261
Principio de Huygens 113
la relatividad 223
Prójorov, A.M. 279

Quarks (cuarques) 333

Radiación inducida 279
- infrarroja 245
- ultravioleta 245
Radiactividad 289
Radiocomunicación 131
Radiolocalización 139
Rayo 99
Rayos alfa 291-293
- beta 291-293
- gamma 291-293
- X 246-249
Reacciones nucleares 306
-- en cadena 310
  termonucleares 315
Reactancia inductiva 63
Reactor nuclear 312-315
Red de difracción 211
Reflexión de la luz 158
  -- total 166 168
Refracción de la luz 162
Regla de cuantización 274
Relación de transformación 82
  entre la masa y la energía 233
Relatividad de la simultaneidad 225
-- las distancias 227
  - los intervalos de tiempo 227
Resistencia eléctrica, óhmica 56
Resonancia 32, 34, 65
Roemer, O. 191
Roentgen, W. K 247
Rutherford, E. 267-271, 291

Smerofasotrón 231
Sklodowska-Curie, Marie 290
Skobeltsin, D. V. 288
Soddy, F. 294, 298
Sonar (hidrolocalizador) 108
Stoliétov, A. G. 255
Strassmann, F. 308
Superficie de onda 99

Televisión 141
Teoría de la luz, corpuscular 146
----, ondulatoria 146
--- relatividad 221
- del efecto fotoeléctrico 256-258
Thomson, J. J 267
Timiriázev, K. A 263
Townes, Ch 279
Trabajo de extracción (o salida) 257
Transformador 81
Triodo 68
Tritio 299
Tubo de rayos X 249

Ultrasonido 107
Umbral rojo fotoeléctrico 257
Umov, N. A. 94
Usaguin, I. F. 81

Vavílov, S. I 239, 259
Velocidad de la luz 191-193
-- onda 97
- del sonido 103
Videoseñal (señal de imagen) 142

Yablochkov, P. N. 81
Young, T 198, 207

Zhdánov, A. P 289
Zweig, S 333